

第五十六届常会

临时议程项目 16  
(GC(56)/1 和 Add.1)

## 2012 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 2011 年令人瞩目的发展情况。
- 《2012 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、粮食和农业领域的核技术、人体健康、环境、水资源以及放射性同位素生产和辐射技术。原子能机构网站<sup>1</sup>提供了与《2012 年核技术评论》相关的补充英文文件，内容涉及：发展昆虫不育技术伽马辐照的替代方法；成像技术用于乳腺癌诊断和治疗；辐射技术在采矿和矿物加工中的应用；一国首座核电厂的技术方案；研究堆在引进核电中的作用；以及密封放射源的使用和管理。
- 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 2011 年年度报告》(GC(56)/2 号文件)，特别是其中的技术部分，还可参阅《2011 年技术合作报告》(GC(56)/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。

<sup>1</sup> <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC56/Agenda/index.html>。



# 2012 年核技术评论<sup>2</sup>

## 总干事的报告

### 正文摘要

1. 2011 年，虽然发生了福岛第一核电站事故，核能继续在全球电力生产中发挥了重要作用。由于 2011 年永久关闭了 13 座反应堆，包括在这次事故发生后德国关闭了八座、日本关闭了四座，导致核电总装机容量比前几年略有下降。但并网发电的反应堆达到了七座，而 2010 年为五座，2009 年为两座，2008 年为零座。虽然原子能机构对 2030 年的预测比 2010 年时所作的预测低了 7—8%，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 35%至 100%。促进对核电的兴趣增加的因素没有变化：全球不断增加的能源需求以及对气候变化、能源安全和化石燃料供应不确定性的关切。大部分的增长仍预计发生在已拥有在运核电厂的国家，特别是亚洲国家，中国和印度仍将是核电扩大的主要中心，而俄罗斯联邦也将仍然是强劲增长的中心。对 2030 年的预测增长值减少了 7—8%，是因为德国正在加速取消核电，日本当即关闭了一些反应堆并且日本政府对扩大计划进行了审查，以及若干其他国家暂时延迟了扩大。

2. 各国因福岛第一核电站核事故而采取的措施不尽相同。一些国家宣布对其计划进行审查，比利时、德国和瑞士则采取了逐步完全取消核电的更多步骤，而其他国家则重新强调了其扩大计划。许多成员国在 2011 年开展了国家安全评定评审（通常称为“压力测试”），并承诺迅速完成余下的评定和落实必要的纠正行动。在正在考虑引进核电的国家，对核电的兴趣仍然强劲。虽然一些国家表示将推迟启动核电计划的决定，但其他国家则继续实施引进核能的计划。

3. 原子能机构在 2011 年 6 月召集了“部长级核安全大会”。会议的目的是讨论对福岛事故的初步评定，审议需要汲取的教训和帮助启动加强全球核安全进程以及审议进一步加强对核事故和紧急情况响应办法。2011 年 9 月的大会核可了原子能机构“核安全行动计划”，其中确定了 12 项主要行动。

---

<sup>2</sup> 自《2012 年核技术评论》开始，报告中涵盖核科学和应用的部分将重点涉及几年来发展最为显著的那些主题领域。由于主题领域的数量减少，对显著趋势和发展的叙述将更加详细。2013 年的“核技术评论”将继续采用这种突出重点的过程。

4. 在 2011 年版的经济合作与发展组织（经合组织）核能机构-原子能机构“红皮书”中，对低于 130 美元/千克铀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，并首次报告在澳大利亚的哈尼穆恩原地浸出矿进行了商业生产。铀的现货价格在 2010 年底创下了两年来的最高水平（160 美元/千克铀），但在福岛第一核电站事故后下降，年底时降至每千克 135 美元。

5. 2010 年 12 月在俄罗斯联邦安加尔斯克国际铀浓缩中心建立了原子能机构主持下的世界上第一个低浓铀储备库，该储备库装有 120 吨低浓铀。自 2011 年 2 月 3 日起，安加尔斯克低浓铀储备已提供原子能机构成员国使用。此外，2011 年 3 月，理事会核准了由英国提出的并且以欧洲联盟（欧盟）成员国、俄罗斯联邦和美国作为共同提案国的核燃料保证建议。核燃料保证建议的目的是确保用于核电厂的浓缩服务和低浓铀的供应。另外，在 2011 年期间，秘书处还继续为原子能机构协调的低浓铀银行的行政、财政、法律和技术的安排开展工作，以使该银行作为核电生产的最后供应手段。原子能机构接受了哈萨克斯坦关于将乌尔巴冶金厂作为该银行东道场址的提议，并于 2012 年开始了有关“东道国协定”的正式谈判。

6. 在放射性废物管理领域，欧盟理事会在 2011 年 7 月 19 日通过了一项指令，要求制订一个关于以负责任和安全的方式管理乏燃料和放射性废物的共同体框架。该指令对所有欧盟成员国实行一套基于原子能机构安全标准的统一标准。在瑞典，瑞典 SKB 核燃料和废物管理公司在 2011 年 3 月提交了在福什马克建造一个乏核燃料最终处置设施的许可证申请。在美国，美国核未来蓝带委员会在 2011 年 7 月为制订管理美国乏燃料和核废物的长期解决方案提出了建议草案。2012 年 1 月发表了最后报告。

7. 2011 年，粮食及农业组织和世界动物卫生组织宣布全球已根除牛疫。牛疫是牛最严重的传染病，也是若干世纪中造成饥荒和贫困的一个主要原因。继 1980 年根除天花之后，这仅是已被成功根除的第二种疾病。通过发展和利用诊断实验如原子能机构动物生产和健康实验室开发的酶联免疫吸附测定，核和核相关技术作出了重要的贡献。

8. 粮食贸易的全球化加上动物的流动使得新出现和重新出现的动物疾病及植物疾病和虫害空前增加。2011 年期间，在利用核技术处理其他跨境动物疾病包括禽流感（例如，利用稳定同位素追踪疫情爆发的源头）方面取得了进展。科学家还在研究利用辐照生产用于治疗口蹄疫、裂谷热、流感和其他病毒性病原体的病毒疫苗作为虫害防治计划一部分的昆虫不育技术传统上使用产生  $\gamma$  射线电离辐射的钴-60 或铯-137 辐照器。但是，由于在物流上日益加剧的困难，科学家们正在探索新的昆虫不育方法，如采用自持型低能 X 射线辐照器。

9. 福岛事故对该场址周围大面积的农业用地造成了显著影响，并对制订防止辐射污染的农业对策提出了新的挑战。虽然正在对以前发生事故（如克什特姆事故和切尔诺贝利事故）后有效利用的许多方案如基于土壤的措施和农用化学补救措施进行进一步

的试验并且它们正在福岛地区进行部分使用，但受影响地区的特定状况要求采取新的方案，以确保食品安全和可持续农业生产。

10. 在环境保护领域，福岛事故表明，需要非常迅速地对大量环境样品作出分析，以便遵守监管限值和质量标准。快速方法使得能够将分析所需的时间从数日或数周减至数小时或数日。最为重要的是，对于放射性核素，有必要验证和实施这类方法，因为放射性核素会为所有潜在受影响环境介质以及食品和动物饲料带来很大的放射性关切。

11. 使用经过良好表征和验证的取样和分析程序对跨境环境评定而言特别重要。原子能机构协调着一个由测量环境放射性分析实验室组成的全球网络，目的是在发生放射性意外或有意释放事件时提供可靠和及时的环境样品分析。2011年由测量环境放射性分析实验室网组织的水平测试侧重于水土样品中的 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 发射体。在2012年，将侧重于气溶胶样品的质量和可比性。与环境取样更常用的空中和地面原地 $\gamma$ 能谱测量相比，显然需要通过对沿海环境进行固定式和移动式高分辨率 $\gamma$ 能谱测量实施原地地下水监测，这将使得能够重建液态放射性释放和快速检查水污染和沉积物污染。

12. 在人体健康领域，日益认识到，在生命中从受孕到两岁的第一个1000天期间的适当营养可对一个儿童的发育和学习能力以及在生命的以后阶段患上慢性疾病如糖尿病和心脏病的危险产生深远影响。核技术如稳定同位素稀释为监测人体组成相对较小的变化提供了优势，可用于评价营养学干预计划。在智利，稳定同位素技术评价国家干预计划的成功利用导致在2011年制订了针对6个月至24个月儿童的“促进运动能力发展和体育活动计划”。

13. 作为提高放射性治疗数据管理质量努力的一部分，利用“记录和验证系统”的趋势正在不断发展，该系统是一种放射治疗患者数据库管理系统。为了促进安全和有效的患者治疗，原子能机构在2011年编写了关于“记录和验证系统”良好质量管理的导则，该导则得到了所有放射治疗设备主要供应商的认可。各种诊断成像方案正在乳腺癌的检测和治疗中发挥越来越大的作用。最近在成像技术领域的进步加之计算机技术领域的发展已从根本上改进了肿瘤定向和辐射治疗规划过程。原子能机构通过其“治疗癌症行动计划”，与世卫组织等伙伴合作，在2011年继续向成员国提供全面的癌症防治。

14. 在水资源领域，同位素技术和相关工具加之地理信息系统和地质统计方法等在绘图方面取得的近期发展有助于水事管理人员更好地进行含水层和地下水水体的划定、量化和可视化。2011年，使用基于激光光谱测定的低成本和易于操作设备分析水中的稳定同位素成为全世界研究团体的标准程序，这使得他们能够更加独立地为水文学评定进行稳定同位素分析，从而节省了资金和时间。例如，评定厄瓜多尔圣埃伦娜半岛地下水资源的同位素研究提供的资料对增加该地区许多居民的水供应起到了帮助作用。

15. 核成像领域的进展与具有新型物理和化学特性的新放射性核素的生产密切相关。2011年，用发生器生产的正电子发射断层照相用放射性核素在澳大利亚、中国、法国、德国、印度、日本、大韩民国、英国和美国等国家变得越来越易于获取，因为它们能够在没有现场回旋加速器的医院中生产。在2011年观察到的另一个趋势是许多制造商对其回旋加速器系统进行了升级，以便实现更强的束流和更高的能量，满足当前对正电子发射断层照相和单光子发射计算机断层照相等诊断技术以及治疗应用中使用的放射性核素的需求。

16. 在辐射技术领域，在2011年的辐射加工国际会议上，报告开发了高效疟疾疫苗，它们目前正处于临床试验的后期阶段。该疫苗基于 $\gamma$ 辐照致弱孢子，可防止疟疾的血液阶段感染，保护人们免于这种疾病和阻止这种疾病的传播。

17. 在2011年另一个与生物燃料相关的发展中，将热水解的使用与对甘蔗渣的电子束辐照相结合表明可导致生物乙醇产量增加。对由日本原子力研究开发机构量子束科学部开发的辐射接枝纤维高分子薄膜有选择性地去除因福岛事故而受到污染的两个场址上的放射性铯进行了成功的验证。放射性示踪剂和核子测量仪表正在越来越多地用于采矿，主要是用于自然资源的勘探和有效开发。

## A. 动力应用

### A.1. 当今的核电

1. 2011年，核能继续在全球电力生产中发挥重要作用。截至2011年12月31日，全世界共有435座核动力反应堆在运行，总容量达到近369吉瓦（电）<sup>3</sup>（见表A-1）。这表示比2010年底的总容量下降了约7吉瓦（电），其主要原因是永久关闭的数量高于并网发电数量。新并网发电的反应堆是：中国的岭澳4号（1000兆瓦（电））、秦山二期4号（610兆瓦（电））和中国实验快堆（20兆瓦（电））；印度的凯加4号（202兆瓦（电））；伊朗伊斯兰共和国的布什尔1号（915兆瓦（电））；巴基斯坦恰希玛核电站二期（300兆瓦（电））；以及俄罗斯联邦的加里宁4号（950兆瓦（电））。

2. 福岛第一核电站事故对2011年新反应堆开工总数产生影响。新反应堆开工数自2003年以来一直稳定增加，在2010年达到峰值16座，而2011年这种趋势则停止，仅有4座核电厂开工：巴基斯坦的恰希玛核电站三期和四期以及印度的拉贾斯坦7号和8号。

3. 2011年，13座反应堆正式宣布永久关闭。它们不仅包括日本福岛第一核电站1号、2号、3号和4号机组，而且包括德国的彼布利斯A和B、布龙斯比特尔、伊萨尔I、克吕梅尔、内卡韦斯特海姆1号、菲利普斯堡1号和布拉克。英国的奥尔德伯里A2号核电站也由于反应堆老化而关闭。这表示自切尔诺贝利事故造成类似影响的1990年以来关闭数目达到最多。相比之下，2010年仅一座关闭，2009年有三座关闭。

4. 截至2011年12月31日，共有65座反应堆在建。这一数字尽管同比较小，但仍很高。此外，和往年一样，扩建以及近期和长期增长前景仍以亚洲为中心（参见表A-1）。事实上，在建反应堆总数中，不少于44座在亚洲，同样在近期已并网发电的45座新反应堆中，有35座在亚洲。

5. 尽管发生了福岛第一核电站事故，但2011年在许多国家仍继续保持了近期许多在运反应堆提高出力和更新或展期许可证的趋势。在加拿大，加拿大核安全委员会准许魁北克的根蒂利2号反应堆运行许可证展期5年。在芬兰，芬兰电力公司2011年完成了奥尔基卢奥托核电站2号机组系列整修的最后一项工作，使该反应堆的容量（860兆瓦（电））提高了20兆瓦（电），从而使奥尔基卢奥托2号机组的总输出功率达到880兆瓦（电），与最初的660兆瓦（电）相比，增加了三分之一。在法国，法国核安全局批准将费桑海姆电站1号机组运行寿期再延长10年。在墨西哥，今年年初，该国2座反应堆在完成为期4年的现代化改造项目后，容量增加了20%。在西班牙，核安全委

---

<sup>3</sup> 1吉瓦（电）相当于10亿瓦（电）。

员会批准了科夫伦特斯核电站和阿斯科核电站 2 台机组为期 10 年的运行许可证展期。此外，将阿尔马拉斯核电站 2 座反应堆出力提高了 70 兆瓦（电）。在斯洛伐克，斯洛伐克电力公司完成了博胡尼斯核电站 2 台机组的现代化改造和提高出力计划。在美国，核管理委员会将以下机组运行许可证又展期 20 年：佛蒙特州扬基；普雷里岛 1 号和 2 号；基瓦尼；珀洛维德 1 号、2 号和 3 号；萨勒姆 1 号和 2 号；以及霍普河。这使得美国许可证获准展期总数自 2000 年以来达到 71 个。15 项许可证展期申请目前正在审查中。此外，2011 年，5 个提高出力申请获美国核管会批准，20 项提高出力申请目前正在审查中。最后，福岛第一核电站事故发生后的首个新核电站选址于 2011 年 10 月被宣布，芬兰波海约基市被芬兰的芬诺能源公司选定为该国第三座核电站场址。

6. 由于福岛第一核电站事故，世界各国对此采取的措施不尽相同。许多国家宣布对其核电计划实施审查，一些国家采取完全淘汰核电的步骤，而另外一些国家则重新主张扩大现有计划的想法。这次事故尽管并未改变正在驱动全球主要核电扩展的中国、印度和俄罗斯联邦等国家的政策，但提出了原子能在一些国家中的未来作用的问题。在比利时，2011 年 10 月，重新确认了 2003 年做出、2009 年重新审议的 2015 年关闭该国最老核动力反应堆的决定，并且政府拟将核工业每年支付的核电特别税翻倍。在法国，在对核电的未来作用展开了激烈辩论。在德国，2011 年 6 月，政府批准了导致将在 2022 年底以前完成德国核反应堆逐渐永久关闭的一系列法律。此外，德国 8 座最老反应堆机组在 2011 年 8 月宣布永久关闭。在 1990 年关闭了最后一座在运核电站后考虑恢复核电计划的意大利，经 2011 年 6 月公民投票表决，决定核能至少 5 年内不再作为选择。在日本，能源和环境委员会 2011 年 7 月宣布打算减少该国对核电的依赖。日本政府在 2011 年 10 月发表的《白皮书》中确认了这一点，宣布日本在中长期将尽可能多地减少对核能的依赖，将制订新的能源政策。截至 2011 年 11 月底，在运的日本核发电容量不到 20%。在瑞士，2011 年 9 月，议会就批准到 2034 年淘汰核电的动议进行了投票。预计就此问题作出最终决定前将进行全民公决。<sup>4</sup>

7. 不过，尽管最近出现了这些事态发展，核电不仅对于拥有现有核电计划的国家，而且对于能源需求不断增长的发展中国家，仍是一个重要选择。虽然一些国家表示将推迟是否启动核电计划的决定，但另外一些国家汲取福岛第一核电站事故的教训，继续开展采用核能的计划。2011 年 9 月，伊朗伊斯兰共和国开始首座核电站试运行。若干国家 2011 年为实现首座核电站运行采取了具体步骤。阿拉伯联合酋长国和土耳其分别与大韩民国和俄罗斯联邦的供应商合作，推动核电计划。2011 年 10 月，白俄罗斯与俄罗斯联邦国营原子能建设出口公司签署了两座核动力反应堆建设合同。2011 年 11 月，孟加拉国就两座 1000 兆瓦（电）反应堆供应及燃料供应、乏燃料返回、培训和其他服务与俄罗斯签署了一项政府间协定。另外，11 月，越南就其首座核电站融资与俄罗斯联邦签署了贷款协定。

---

<sup>4</sup> 此外，2011 年 11 月，中国台湾宣布了取消核电的新核能政策，尽管没有规定具体的时间表。



8. 2011 年，原子能机构在孟加拉国和阿联酋进行了“综合核基础结构评审”工作组访问。大会 2011 年 9 月通过的原子能机构“核安全行动计划”还鼓励新加入国家在基础结构规划中汲取福岛第一核电站的教训，在开始首座核电站试运行前，邀请开展“综合核基础结构评审”工作组访问等评审服务。在整个 2011 年期间，原子能机构继续向成员国提供广泛的援助和支持服务，包括导则和标准、技术援助、评审服务、培训、能力建设和知识网络，其中许多服务正在接受审查，以考虑福岛事故的教训。虽然少数国家在推动计划的发展和努力成为“熟悉情况的客户”，但原子能机构的援助特别是对新业主/营运者组织的援助正在增加。

表 A-1. 全世界正在运行和建造的核动力反应堆（截至 2011 年 12 月 31 日）<sup>a</sup>

国 家	在运反应堆		在建反应堆		2011 年供应的核电量		截至 2011 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	5.0	66	7
亚美尼亚	1	375			2.4	33.2	37	8
比利时	7	5 927			45.9	54.0	247	7
巴西	2	1 884	1	1 245	14.8	3.2	41	3
保加利亚	2	1 906	2	1 906	15.3	32.6	151	3
加拿大	18	12 604			88.3	15.3	618	2
中国	16	11 816	26	26 620	82.6	1.9	125	6
捷克共和国	6	3 766			26.7	33.0	122	10
芬兰	4	2 736	1	1 600	22.3	31.6	131	4
法国	58	63 130	1	1 600	423.5	77.7	1816	4
德国	9	12 068			102.3	17.8	782	9
匈牙利	4	1 889			14.7	43.3	106	2
印度	20	4 391	7	4 824	29.0	3.7	357	3
伊朗伊斯兰共和国	1	915			0.1		0	4
日本	50	44 215	2	2 650	156.2	18.1	1546	4
大韩民国	21	18 751	5	5 560	147.8	34.6	381	1
墨西哥	2	1 300			9.3	3.6	39	11
荷兰	1	482			3.9	3.6	67	0
巴基斯坦	3	725	2	630	3.8	3.8	52	8
罗马尼亚	2	1 300			10.8	19.0	19	11
俄罗斯联邦	33	23 643	10	8 188	162.0	17.6	1058	4
斯洛伐克	4	1 816	2	782	14.3	54.0	140	7
斯洛文尼亚	1	688			5.9	41.7	30	3
南非	2	1 830			12.9	5.2	54	3
西班牙	8	7 567			55.1	19.5	285	6
瑞典	10	9 326			58.1	39.6	392	6
瑞士	5	3 263			25.7	40.9	184	11
乌克兰	15	13 107	2	1900	84.9	47.2	398	6
英国	18	9 953			62.7	17.8	1495	2
美利坚合众国	104	101 465	1	1 165	790.4	19.3	3707	11
总计 <sup>b,c</sup>	435	368 791	65	61 962	2 518.0	12.3% <sup>d</sup>	14 792	3

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

b. 说明：总计中包括以下中国台湾的数据：

在运 6 台机组，5018 兆瓦（电）；在建 2 台机组，2600 兆瓦（电）。

核发电量为 40.37 太瓦·小时，占总发电量的 19.02%。

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（182 年零 1 个月）的已关闭核电厂。

d. 系 2011 年供应的全球核能百分比。

## A.2. 核电增长预测

9. 原子能机构每年对全球核电的增长发布两种经过更新的预测：低值预测和高值预测。2011 年更新版考虑了福岛第一核电站事故的影响。在 2011 年更新版中，关于 2030 年全球核电装机容量的预测比该事故前所作的预测低了 7—8%。因此，从全球看，预计该事故将放缓或延迟核电的增长，而不是逆转。就经过更新的低值预测而言，全球核电装机容量从 2011 年底的 369 吉瓦（电）增长到 2030 年的 501 吉瓦（电），比去年所作的预测降低了 8%。就经过更新的高值预测而言，装机容量将在 2030 年增长到 746 吉瓦（电），比去年的预测降低了 7%。尽管如此，就 2030 年在运核反应堆的数量而言，在低值预测中可以预计将增加约 90 座，在高值预测中将增加约 350 座，而 2011 年底的总数为 435 座。预计大部分增长将出现在已经拥有运行中核电厂的国家。

10. 同前几年一样，预测的增长在远东最高。到 2030 年，装机容量将从 2010 年底的 81 吉瓦（电）分别增长到低值预测的 180 吉瓦（电）和高值预测的 255 吉瓦（电）。但这两种增长水平都分别比去年的预测值低了 17 吉瓦（电）和 12 吉瓦（电）。

11. 西欧显示了低值预测与高值预测之间的最大差距。就低值预测而言，该地区的核电装机容量从 2010 年底的 123 吉瓦（电）降到了 2030 年的 83 吉瓦（电）。就高值预测而言，核电增长到 141 吉瓦（电），但这仍比去年预测的增长值低了 17 吉瓦（电）。在北美，低值预测略有下降，从 2010 年底的 114 吉瓦（电）降到了 2030 年的 111 吉瓦（电）。高值预测设想增长到 149 吉瓦（电），但这仍比去年的预测值低了 17 吉瓦（电）。

12. 其他拥有大量核电计划的地区有东欧（包括俄罗斯联邦）、中东以及南亚（包括印度和巴基斯坦）。无论是低值预测还是高值预测，这些地区的核电都扩大到仅比去年的预测值略低的水平。计划规模较小的非洲、拉丁美洲和东南亚的情况也是如此。

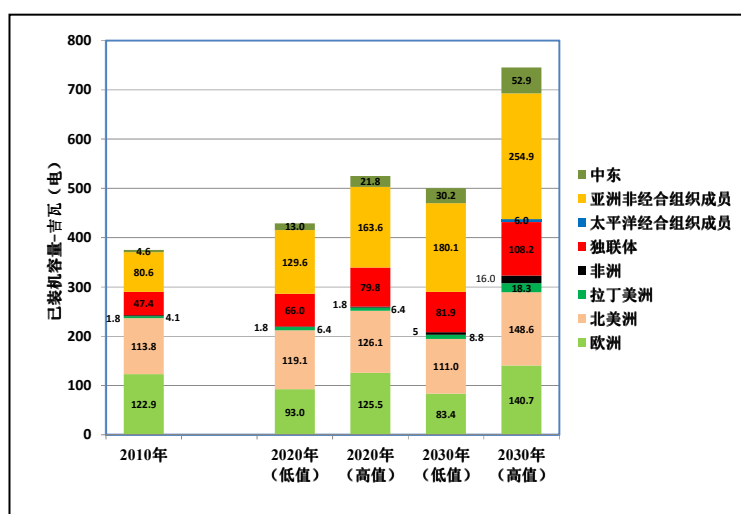


图 A-1. 2011 年原子能机构对 2010—2030 年各地区发展核发电容量的低值和高值预测。

13. 原子能机构的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。但不一定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。高值预测则假设，当前的金融和经济危机不久将会被克服，以往的经济增长率和电力需求将得到恢复，尤其是在远东。此外，高值预测还假设全球实行严格的气候变化缓解政策。

14. 低值预测和高值预测的继续增长设想都暗示，福岛第一核电站事故前促进核电兴趣增长的因素没有发生变化。这些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。

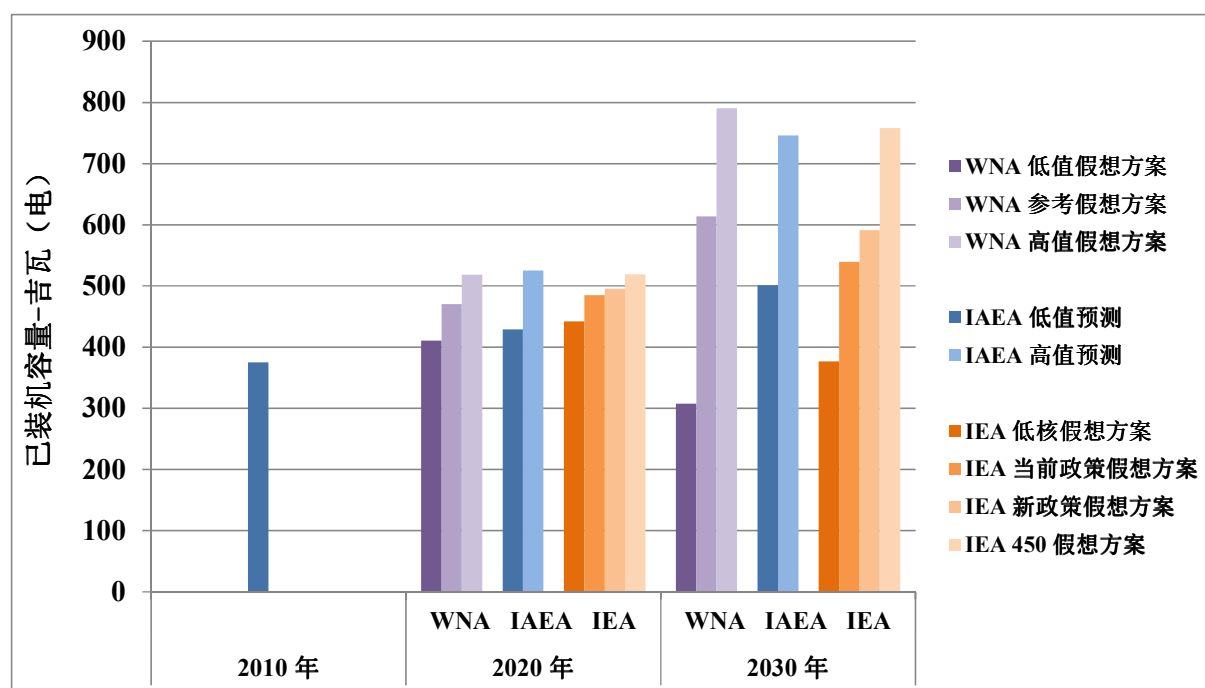


图 A-2. 国际原子能机构 (IAEA: 蓝色)、世界核协会 (WNA: 紫色) 和国际能源机构《2011 年世界能源展望》(IEA: 橙色) 核电预测比较。

15. 经合组织国际能源机构也发表了全球核电增长预测。国际能源机构《2011 年世界能源展望》介绍了四种有趣的假想方案。尽管主报告侧重于分别称为“当前政策假想方案”、“新政策假想方案”和“450 假想方案”(450 系指将大气中温室气体浓度限制在百万分之 450) 的三种假想方案，但福岛第一核电站事故却促使国际能源机构探究在另一种假想方案即低核假想方案中大幅度摆脱核电的影响。低核假想方案假设，经合组织成员国将不建造任何新反应堆，在经合组织之外，新政策假想方案中所设想的新反应堆将只建造一半数量。低核假想方案还假设，现有核电厂的运行寿期将会缩短。核电预测的减少导致可再生能源发电份额适度增加以及预测煤炭消费、天然气消费、能源价格和温室气体排放量将大幅度上升。这种排放量的上升将使得几乎不可能将全球平均气温的上升保持在低于 2°C 以下相当于工业化以前的水平，从而引发气候学上目

前所称的对气候系统危险的人为干预。图 A-2 对原子能机构的预测、国际能源机构的各种假想方案和世界核协会的预测<sup>5</sup>进行了比较。原子能机构的低值预测、国际能源机构的当前政策假想方案和世界核协会的参考假想方案全都使用了类似的“一切照旧”的假设，并得出了可以比较的结果。这些组织的高值假想方案也是可以比较的，国际能源机构和世界核协会的低核假想方案也是如此。

### A.3. 燃料循环<sup>6</sup>

#### A.3.1. 铀资源和生产

16. 原子能机构和经合组织核能机构每两年都要出版一本所谓的“红皮书”——《铀资源、生产和需求》。最新版“红皮书”已于 2012 年 7 月出版。2011 年版“红皮书”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。这比上一版所作的估计少了 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。为参考起见，2011 年铀的现货价格直到 3 月都在 165 美元/千克铀至 169 美元/千克铀之间波动，创下两年来的最高价格，随后在福岛第一核电站事故后跌落至 150 美元/千克铀。现货价格于 8 月逐步回落到 132 美元/千克铀，但到年底又攀升回到 135 美元/千克铀。

17. 未探明资源既包括预计存在于已知矿床中或已知矿床附近的资源，也包括据认为存在于地质上有利但尚未勘探区域中的更多推测储量。“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（2010 年出版）报告的 1040 万吨铀略有增加。成本低于 130 美元/千克铀的未探明的常规资源估计为 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 万吨的估计储量，其生产成本还未具体确定。

18. 2011 年报告在非洲即博茨瓦纳、毛里塔尼亚伊斯兰共和国、马拉维、马里、纳米比亚、赞比亚和坦桑尼亚联合共和国发现了许多铀矿床附加储量，这些国家的勘探活动仍然十分活跃。坦桑尼亚联合共和国姆库尤河项目达到可行性研究后期阶段。南美也报告哥伦比亚、圭亚那、秘鲁和巴拉圭发现了更多资源或新资源。

19. 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资源。与磷酸盐、有色金属矿石、碳酸盐岩、黑色页岩和褐煤伴生的潜在可回收铀的当前估计量约为 800 万吨铀。铀股份有限公司宣布其利用离子交换技术从磷酸中回收铀的中试厂定于 2012

---

<sup>5</sup> 《2011—2030 年全球核燃料市场供需状况》，世界核协会，伦敦，2011 年。

<sup>6</sup> 有关原子能机构核燃料循环相关活动的更详细资料可见 GovAtom/GC 网站所载最新的“年度报告”(<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2011>)相关部分和 [www.iaea.org/NuclearFuelCycleAndWaste](http://www.iaea.org/NuclearFuelCycleAndWaste)。

年5月开始投产。如果该技术取得成功，预计将于2015年左右开始商业生产。

20. 世界范围的钍资源约有600万至700万吨。尽管钍作为燃料一直在进行示范性使用，但在其能够与铀平起平坐地加以考虑之前还需要进一步开展大量的工作。在印度，该国规划的实验性300兆瓦（电）钍燃料先进重水堆于2011年开始了选址过程。预计该反应堆将于2020年开始运行。但预计在2030年前先进重水堆不会全面商业化。

21. 该“红皮书”仅报告了直到2008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%。

22. 2010年，全世界的铀产量超过54 670吨铀，比2009年生产的51 526吨铀增长6%。估计2011年铀产量将增加到约57 230吨铀。澳大利亚、加拿大和哈萨克斯坦2010年的铀产量占到世界总产量的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占到总产量的92%。哈萨克斯坦2010年的铀产量比上一年增长了27%以上，使其连续两年成为全球遥遥领先的最大的铀生产国（从2003年的第五位和2008年的第二位）。而且，哈萨克斯坦2011年的总产铀量预计将比2010年增加12%。

23. 2011年9月，首次报告在澳大利亚哈尼穆恩原地浸出<sup>7</sup>矿进行了商业生产。在全面投入运行后，该矿的生产能力预计将达到400吨铀/年（2012年为275吨铀）。此外，南澳大利亚采矿中心奥林匹克坝已取得其扩展项目的环境解控，该项目设想沿现有地下矿开辟一个新的露天矿。该项目将使该矿的年生产能力从目前的3800吨铀增加到19 000吨铀。此外，尼日尔的阿泽利克铀矿也于2010年12月开始试运行，预计将于2012年达到每年700吨铀的满负荷生产能力。

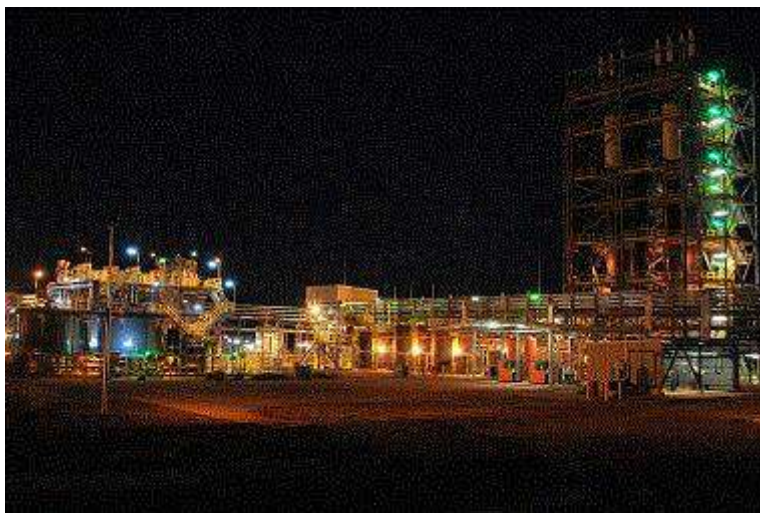


图 A-3. 澳大利亚哈尼穆恩铀矿于2011年9月开始商业生产。

---

<sup>7</sup> 传统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富液抽运到地表，然后便可从富液中回收矿物。因此，只有有限的地表扰动，并且不产生任何尾矿或废石。

24. 2010 年的铀产量仅涵盖全世界反应堆 63 875 吨铀估计需求的约 85%。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铀-239 部分替代铀-235 的混合氧化物燃料以及贫化铀尾料再浓缩（贫化铀的铀-235 丰度低于 0.7%）。按估计的 2010 年消耗率，可以低于 130 美元/千克铀回收的 530 万吨已确定常规铀资源的预测使用期限差不多为 80 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。

25. 根据 2010 年所作的预测，世界反应堆相关的年度铀需求到 2035 年将上升到 97 645 吨铀至 136 835 吨铀之间。目前预测的初级铀生产能力包括现有的、承诺的、计划的和预期的生产中心可以满足直到 2028 年（基于上述范围的高端）或直到 2035 年（基于上述范围的低端）预测的世界铀需求。

### A.3.2. 转化、浓缩和燃料制造

26. 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、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，而所有其它转换器都使用湿法工艺。全球年总转化能力就六氟化铀而言仍稳定在每年约 7.5 万吨天然铀。但该领域大的变化预计将出现在法国（阿海珐集团 Comurhex II 项目）和美国（霍尼韦尔大都会工程厂）。当前的转化服务需求总量（假设铀-235 浓缩尾料丰度为 0.25%）<sup>8</sup> 每年在 5.9 万至 6.5 万吨铀之间。

27. 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（中国核工业集团公司）、法国（阿海珐集团）、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行。铀浓缩公司在德国、荷兰、英国和美国运行着离心厂。阿根廷、巴西、印度、伊朗伊斯兰共和国、日本和巴基斯坦还有一些小型浓缩设施。

28. 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：阿海珐集团鹰石浓缩设施和美国离心分离厂。2011 年 10 月，阿海珐集团鹰石浓缩设施取得了许可证。

29. 在皮尔卡尼耶乌重建气体扩散能力的同时，阿根廷还在进行新浓缩技术如离心机浓缩和激光浓缩技术的研究与发展工作。

30. 日本核燃料有限公司预计在 2012 年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，并将目前每年 15 万分离功单位的浓缩能力扩大至 2020 年的每年 150 万分

---

<sup>8</sup> 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。

离功单位。已经根据国家原子能公司与东芝公司之间的一项协议对日本利用俄罗斯离心机技术的新浓缩厂做了规划。

31. 2011年6月，核供应国集团46个国家就新的全球铀浓缩和乏燃料后处理贸易条件达成了协议。根据新准则，希望取得核技术的国家必须满足一系列要求，包括：全面遵守《不扩散核武器条约》；没有被国际监管者指出保障缺陷；遵守原子能机构保障协定；以及遵循国际安全标准。

32. 在三座逆转化设施于2010年开始运行之后，全球2011年现有的总逆转化能力仍约为每年6万吨六氟化铀。这三座设施有两座在美国（肯塔基州帕杜卡和俄亥俄州朴茨茅斯），一座在俄罗斯联邦（位于克拉斯诺亚尔斯克的W-ECP电化学厂）。

33. 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1.3万吨（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（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。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2020年将增加到每年约9500吨铀。就加压重水堆而言，其需求为每年3000吨铀。中国正在扩大现有设施，哈萨克斯坦和乌克兰已计划建造新制造设施。哈萨克斯坦计划的预计每年1200吨天然铀能力的制造设施是阿海珐集团与哈萨克斯坦国家原子能公司的一个合资企业，预定于2014年竣工。

34. 再循环作业通过利用后处理过的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海珐集团生产约100吨后处理过的铀。阿海珐集团在法国罗芒的一条生产线已被许可每年将150吨后处理过的铀制作成燃料，已经向比利时、法国和英国的反应堆交付了这一类型的压水堆组件。

35. 混合氧化物燃料的当前制造能力约为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的设施。在日本，日本核燃料有限公司正在六所村建造一座新的混合氧化物燃料制造设施（130吨重金属混合氧化物燃料），并计划于2016年3月完工。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厂建立了中试设施。英国正在给塞拉菲尔德公司混合氧化物燃料制造厂增加一座新的混合氧化物制造设施，以使其有能力履行供应混合氧化物的新的长期合同。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。全世界目前有32座热堆使用混合氧化物燃料。

### **供应保证**

36. 2010年12月在俄罗斯联邦安加尔斯克国际铀浓缩中心建立了原子能机构主持下的世界上首批低浓铀储备。该批低浓铀储备包括120吨低浓铀，其中三分之一的浓缩丰度为4.95%，原子能机构保障视察员2010年12月对此进行了核实。该批低浓铀储备



目前的价值超过 3 亿美元，可以提供给其低浓铀供应由于同技术或商业考虑无关的原因而中断的原子能机构成员国。该低浓铀应当由原子能机构按市场价格提供给合格的成员国进行核电生产，所得收入应当用于补充低浓铀库存。俄罗斯联邦承担该低浓铀的储存、维护、安全、安保和保障费用。2010 年 3 月 29 日签署的《俄罗斯联邦政府和国际原子能机构关于在俄罗斯联邦领土上建立低浓铀实物储备以供国际原子能机构向其成员国供应低浓铀的协定》于 2011 年 2 月 3 日开始生效。安加尔斯克的低浓铀储备自该日起已可提供给原子能机构成员国使用。

37. 2011 年 3 月，原子能机构理事会核准了英国提出的并且以欧洲联盟成员国、俄罗斯联邦和美利坚合众国作为共同提案国的关于“核电厂所用浓缩服务和低浓铀供应保证”（核燃料保证）的建议。该建议提出了“核燃料保证协定范本（草案）”，根据该协定，供应低浓铀或浓缩服务的国家可以同意不中断对遵守国际义务的接受国的供应；该建议还公布了出口许可证标准。该建议最初由英国于 2007 年提出，并在 2009 年得到进一步发展。

38. 此外，理事会还于 2010 年 12 月核准建立由原子能机构所有和运营的原子能机构低浓铀银行，即将处在原子能机构管辖和控制下的低浓铀实物库存。该低浓铀银行所起的作用是：在成员国的低浓铀供应中断且无法通过商业手段恢复并在当事国符合理事会规定的资格标准的情况下，充当支援而非扭曲商业市场的机制。2011 年，原子能机构秘书处继续研究制订必要的各种行政、财务、法律和技术安排。2011 年 5 月，原子能机构散发了关于具备设立原子能机构低浓铀银行的适当场址的东道国遴选标准，并请成员国提出成为原子能机构低浓铀银行东道国的意向书。哈萨克斯坦是惟一正式提交这种“意向书”的成员国，原子能机构接受了哈萨克斯坦关于将该银行的东道场址设在乌尔巴冶金厂的提议，并于 2012 年开始了“东道国协定”的正式谈判。原子能机构的小组于 2012 年访问了乌尔巴场址，详细评定了对安全和安保升级的要求。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 2011 年底，挪威（500 万美元）、美国（约 5000 万美元）和“反对核威胁倡议”（5000 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 1000 万欧元，与科威特（1000 万美元）和阿拉伯联合酋长国（1000 万美元）的安排正在最后敲定。

39. 成员国的权利包括建立或扩大本国核燃料循环生产能力的权利仍将不受影响，并且决不会因建立这种供应保证机制而受到减损。

40. 2011 年 8 月，美国也开始提供“美国有保证的燃料供应”，其中包括 230 吨丰度 4.95%的低浓铀。

### **A.3.3. 核燃料循环后端**

41. 2011 年，所有核动力堆共卸出约 1.05 万吨重金属乏燃料。到 2011 年 12 月，全球已卸出的乏燃料累积总量接近 35.05 万吨重金属，其中约 24 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有不到三分之一的数量约 10 万吨已进行了后处理。2011 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。

42. 到 2011 年年中，中国完成了其年处理 50 吨重金属的后处理中试厂的冷试验以及 5%热试运行（5%乏燃料溶液 + 95%模拟溶液）。研究与发展工作正在继续，以期为该后处理中试厂的稳定运行提供技术支持。中国还正在计划建造一座商业后处理设施，选址过程正在进行。此外，在秦山核电站完成了再循环铀作为燃料在坎杜堆中直接使用的验证工作。在 2010 年和 2011 年，含有通过混合后处理铀和贫化铀获得的天然铀当量的 24 个坎杜堆 37 根元件燃料棒束在秦山 1 号机组进行了辐照，这些棒束经验证具有良好的燃料性能。

43. 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。该设施包括一座燃料制造和后处理厂、一座堆芯分组件厂、一座后处理铀氧化物厂和一座服务于即将建成的 500 兆瓦（电）原型快中子增殖堆的废物管理厂。

44. 在日本，年处理 800 吨重金属的六所村商业后处理厂在由于 2011 年 3 月 11 日的地震和海啸而被中止时建造工作已接近完成。

#### **A.3.4. 放射性废物管理和退役**

45. 据报告，在可获得数据的最近年份即 2010 年底贮存中的全球放射性废物存量达到约 6140 万立方米短寿命中低放废物<sup>9</sup>、1390 万立方米长寿命中低放废物和 42.3 万立方米高放废物（见表 A-2）。

46. 到 2010 年底，累积处置的放射性废物总量包括约 2470 万立方米的短寿命中低放废物、62.5 万立方米长寿命中低放废物和所处置的主要来自切尔诺贝利的约 4000 立方米高放废物。长寿命中低放废物和高放废物处置与贮存的比率低反映了在世界范围内普遍缺乏处置这两类废物的能力。

---

<sup>9</sup> 短寿命中低放废物贮量自《2011 年核技术评论》以来明显增加系由于将低放液体放射性废物贮量的新数据纳入所致。

表 A-2. 2010 年全球放射性废物存量估计数量（最新数据）<sup>10</sup>

废物分类 <sup>11</sup>	贮存 <sup>12</sup> (立方米)	累积处置量 (立方米)
短寿命中低放废物	61 381 000	24 720 000
长寿命中低放废物	13 901 000	625 000
高放废物	423 000	4 000

来源：“网基废物管理数据库”（2011 年）和其他参考文献。<sup>13</sup>

47. 在世界范围内，各类放射性废物的处置设施都在运行或正在开发中。处置方案包括：深沟处置极低放废物（法国、西班牙、斯洛伐克、瑞典）、天然存在的放射性物质废物（马来西亚、阿拉伯叙利亚共和国）和干旱地区的低放废物（伊朗伊斯兰共和国、南非、美国）；用于低放废物的近地表专设结构（比利时、保加利亚、捷克共和国、法国、印度、日本、立陶宛、罗马尼亚、斯洛伐克、斯洛文尼亚、西班牙、英国）；中等深度处置中低放废物（捷克共和国、匈牙利、日本、大韩民国、挪威）和天然存在的放射性物质废物（挪威）；钻孔处置低放废物（美国）和弃用密封源（加纳、马来西亚、菲律宾）；以及设计用于处置中低放废物（德国、美国）和高放废物和（或）乏燃料（芬兰、法国、瑞典）的深部地质设施。

48. 比利时打算在代瑟尔市的一个地表处置设施处置短寿命中低放废物。比利时放射性废物和浓缩易裂变材料管理局于 2009 年启动了包括环境影响评定在内的一项安全论证文件，该文件将于 2012 年最终完成。比利时放射性废物和浓缩易裂变材料管理局随后将提交建造和运行许可证申请。该设施预定于 2016 年开始运行。

49. 在保加利亚，乏燃料贮存设施于 2011 年 5 月在科兹洛杜伊核电厂正式启用。

<sup>10</sup> 表 A-2 中的数字系估计值，不应被误认为是对世界范围内目前管理的放射性废物存量的准确衡算。除每年因废物管理过程期间质量和体积变化所致估计贮存量通常可能的偏差外，由于更多的成员国加入原子能机构“网基废物管理数据库”和这些成员国提供缺失的数据，包括以前年份的数据，衡算废物的总量在持续上升。

<sup>11</sup> “网基废物管理数据库”的存量目前按《放射性废物分类》（原子能机构《安全丛书》第 111-G-1.1 号，维也纳，1994 年）“安全导则”所载废物分类建议进行报告。这些建议现已被《放射性废物分类》（原子能机构《安全标准丛书》第 GSG-1 号，维也纳，2009 年）“一般安全导则”概述的新分类方案所取代。“网基废物管理数据库”中的数据目前正在按照新分类方案进行转换。

<sup>12</sup> 废物在贮存或处置之前通过各种操作步骤进行处理、整备和盘存。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。

<sup>13</sup> 除“网基废物管理数据库”之外，来源还包括可公开获得的《乏燃料管理安全和放射性废物管理安全联合公约》国家报告和其他发表的数据。

50. 在加拿大，安大略电力公司于 2011 年 4 月正式提交了一份环境影响报告和申请许可证的最后文件，以便准备场址并在布鲁斯核场址附近建造一个处置低中放废物的深部地质处置库。目前，正在开展一项可行性研究，以评定乔克河实验室场址作为废物管理地质设施所在地的适宜性，这一处置库标称深度 500 米，已建议在其中隔离和包容源自该实验室的低放废物和中放废物。
51. 在丹麦，2011 年 5 月提交政府的一项研究确定了用于该国低中放废物处置库的六个潜在场地。
52. 在法国，关于处置高放废物主要是核电厂高放废物及其乏燃料后处理的“地质贮存工业中心（Cigéo）”项目将于 2012 年开始工业设计阶段。
53. 在芬兰奥尔基卢奥托，泊西瓦核废物管理公司正在建造昂加洛地下岩石表征设施，该设施在 2010 年达到了最终处置深度。泊西瓦公司打算在 2012 年向芬兰政府提交该场址处置库建造许可证申请，并于 2020 年底开始进行最终处置。
54. 在加纳，一座放射性废物处置设施在阿克拉加纳原子能委员会正式落成，用于安全和可靠地贮存不能使用或不再需要的放射源。
55. 在德国，经过 10 年的暂停之后，2010 年 10 月重新开始对戈莱本矿山进行勘探调查，该矿山是一个有前景的高放废物/乏核燃料处置场址。这些活动正在由德国废物处置库建造及运行技术公司实施。该公司还负责正在进行的康拉德矿山的重建工作，使之成为国家低中放废物处置库。该设施将建在地表下 1000 米至 1100 米深处，预计在 2019 年开始运行。2011 年 2 月，该设施中心部分的回填作业已完成。莫斯莱本处置库的许可证持有者联邦辐射防护办公室已提交关闭许可证申请。
56. 匈牙利放射性废物管理公共有限公司行将完成用于处置核电厂低中放废物的巴塔帕蒂地表（约 200 米）处置库的建造工作。虽然该设施地表部分的贮存区已投入运行，但处置调试定于 2012 年进行。一个类似的处置综合设施预计将于 2012 年在大韩民国庆州建成。该设施的贮存部分已从 2010 年 12 月开始运行。
57. 在立陶宛，国家核电安全检查团已向伊格纳林纳核电厂颁发了建造固体放射性废物回取和预处理设施。
58. 在俄罗斯，克拉斯诺亚尔斯克地区热列兹诺戈尔斯克采矿化学联合企业的一个乏燃料新式干法贮存设施于 2003 年开始建造。该设施第一阶段的建造工作已于 2011 年 12 月完成，其大功率沸腾管式堆的乏燃料容量为 8100 吨。
59. 2011 年 3 月 16 日，瑞典核燃料和废物管理公司向国家当局提交了关于在东哈马尔市福什马克建造一个乏核燃料最终处置设施和奥斯卡港建造一个封装厂的许可证申请。瑞典核燃料和废物管理公司预计该设施可在 2025 年之前投入运行。
60. 美国位于得克萨斯州安德鲁斯县附近的一个新的放射性废物处置设施于 2011 年 11

月启用。该设施由废物控制专业公司运行；浅地沟处置已获得许可证审批，可接受 A 类、B 类和 C 类低放废物。

61. 也是在美国，2010 年 1 月设立的美国核未来蓝带委员会于 2011 年 7 月发布了关于制订管理美国乏核燃料和核废物长期解决方案的建议草案<sup>14</sup>。最后报告已于 2012 年 1 月发表。

62. 欧盟理事会在 2011 年 7 月 19 日核准了一项关于以负责任和安全的方式管理乏燃料和放射性废物的 2001/70/EURATOM 号理事会指令。该指令基于原子能机构关于废物管理和处置的标准对欧盟成员国实行一套统一的标准。该指令包括一项对欧盟成员国制订和维持国家计划的要求，该计划包括除其他外，特别是乏燃料和放射性废物从产生到处置的管理的概念或规划和技术解决方案。成员国必须向欧洲委员会通报其国家计划，并在不晚于 2015 年 8 月 23 日和此后每三年向欧洲委员会提交关于该指令执行情况报告。

63. 高活度源的安全和可靠管理仍构成特别的问题，因为明显的限制因素特别是财政限制使之在使用寿期结束时不容易返还。已开展了一些成功的作业，整備和从用户工作场所移走弃用密封放射源，并通过将它们移至国家放射性废物贮存设施或在一些情况下将它们完全从当事国移出而使之处于控制之下。从最后一个高活度弃用密封放射源被移走进行再循环的 2011 年 9 月起，新加坡在其境内不再拥有任何弃用高活度源。在马达加斯加采取了类似的行动，马达加斯加一个源于法国的远距治疗源在 2011 年 10 月被返还给法国。

### **遗留放射性废物**

64. 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放射性废物项目专家联络组在过去的 15 年来被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。到 2011 年底，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 196 艘进行了燃料拆卸和拆除作业。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。从前海军基地安全移出乏核燃料和废物目前是该专家联络组的优先事项。两个地区性放射性废物整備和贮存中心正在建设之中。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 119 个。

65. 加拿大（乔克河核实验室）、俄罗斯联邦（马雅克和西伯利亚化学联合公司）和美国（萨凡纳河国家实验室）正在实施处理遗留废物的大型计划。在美国汉福德，世界上最大的废物处理厂的建造工作已完成约 50%。该处理厂的预算达 120 亿美元，预计

---

<sup>14</sup> 更多资料可在 <http://brc.gov> 网站上获得。

于 2019 年开始运行。该处理厂将通过预处理并随后通过玻璃固化方式处理并稳固约 20 万立方米的各种复杂的遗留废物。

### **福岛第一核电站事故产生的放射性废物**

66. 福岛事故产生的放射性废物不仅需要在事故后的核电站场址采取长期措施，而且还需要对现场和场外的所有废物的寿期管理采取长期措施。

67. 为了响应日本政府提出的请求，原子能机构组织了一个实情调查工作团。该工作团于 2011 年 10 月 7 日至 15 日为福岛第一核电站场外大面积污染区域的治理提供了支持。该工作团的目的是为日本治理这起事故所致大面积受污染区域的计划提供援助；审查日本的治理战略、计划和活动，包括污染区域图的绘制；以及作为共同努力广泛传播从这起事故汲取的经验教训的一部分，与国际社会共享其得出的结论。于 2011 年 11 月印发的该工作团的报告突出强调了取得重要进展的九个领域，并就该工作组认为可以改进当前实践的 12 个问题要点提出了建议。这些建议涵盖战略、计划和具体治理技术方面的改进措施，并考虑了国际标准和从其他国家的治理计划取得的经验。

68. 福岛附近受污染土地的治理将需要建造能容纳 1500—2800 万立方米废物的贮存设施。这些贮存设施的占地面积将需要 3—5 平方公里，并需要在三年内提供使用。将需要在适当的时候考虑这种废物的最终处置方案。

69. 在反应堆地下室、汽轮机厂房和管沟中被铯-134 和铯-137 污染的大量积水已导致随时都会溢出和向环境泄漏的严峻情况。除了水量大之外，处理这种污染水方面的一个巨大挑战是油和来自海水的高浓度钠离子的存在。现有处理设施已被破坏，目前无法提供使用。通过迅速调动当地和国际支持建立已成功处理超过 15 万立方米废水的高效高通量处理系统，已使这种情况得到控制。采用可移动滑轨式配置部署了各种工艺技术，包括絮凝-析出、沸石离子交换、反渗透和蒸发。去污和除盐后的水被成功地再循环用于冷却受到破坏的反应堆堆芯。目前也正在利用小容量移动式系统对位于反应堆内乏燃料贮存水池中的水进行处理。这种努力所带来的今后挑战涉及高放射性化学污泥和废沸石柱的管理。

70. 将燃料从受到破坏的反应堆中拆除将需要开发专用工具、操作设备和加工难处理的超铀废物的解决方法。开发管理这类废物的工具和方法预计需要一些时间，而且将需要高水平专门知识。

### **退役**

71. 全球动力堆退役统计数字 2011 年变化甚微。截至 2011 年 12 月，有 124 座动力堆被关闭。2011 年完成了一座反应堆即英国温斯克尔先进气冷堆的拆卸工作，从而使已关闭并被完全拆卸的动力堆的数量达到 16 座。50 座动力堆正处在拆卸过程中，49 座正保持在安全关闭模式，三座已经被埋葬，另外六座尚未确定具体的退役战略。

72. 20 世纪 60 年代建造的实验性核电厂温斯克尔先进气冷堆的拆卸工作经过 12 年艰

难的工作后于 2011 年完成。该项目为英国其他 14 座先进气冷堆的退役提供了一个蓝图，因为这些反应堆已接近其使用寿命。

73. 瑞典放射性废弃物处理公司与英国低放废物处置库有限公司在 2011 年末签署了一项关于从已退役的伯克利镁诺克斯核电厂向瑞典运输五个各重 300 多吨的旧热交换器并对它们进行拆卸的合同。在这项工作期间，这些旧热交换器的金属部件多达 90% 将被再循环使用。

74. 在美国，核拆卸和退役的费用估计为 693 亿美元。美国的退役资金已证明是充分的。2010 年宰恩核电厂所有权从爱克斯龙公司向能源方案公司的转让证明，依法分配的为今后退役活动支付资金的费用足够用于这些活动的实际实施。

#### A.4. 安全性<sup>15</sup>

75. 2011 年，确定并应用从 2011 年 3 月 11 日袭击日本的地震和海啸异常自然灾害引起的福岛第一核电站事故可能汲取的教训的必要性主导了关于核电厂安全的讨论。

76. 原子能机构在 2011 年 6 月召集了“部长级核安全大会”，以讨论对福岛事故的初步评定、审议需要汲取的教训、帮助启动加强全球核安全进程以及审议进一步加强对核事故和应急响应的办法。许多成员国在 2011 年开展了作为国家安全评定一部分的审查工作（通常称之为“压力测试”），并作出承诺迅速完成余下的评定和落实必要的纠正行动。

77. 从这起事故获得的初步见解是全世界的核电厂运营者在必要时需要审查和加强：  
(a) 防范像海啸这样的极端危害的保护措施；(b) 严重事故情况下的电力和冷却能力；  
(c) 管理严重事故的准备情况；以及 (d) 电厂的设计基准，即有关将要考虑的一套预先设定的事故假设情况。

78. 虽然仍有教训有待汲取，但业已在国家和国际一级制订了借鉴这起事故的初步教训的行动计划。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。该计划已于 2011 年 9 月经大会通过，并确定了 12 项主要行动。<sup>16</sup>

79. 可以进一步汲取教训，并通过“行动计划”进行更新将其酌情纳入这些行动中。2011 年 12 月，日本政府宣布福岛第一核电站的反应堆达到了“冷停堆条件”并处于稳定状态，以及放射性物质的释放得到控制。

80. 从运行角度看，世界范围内核电厂的安全水平仍然很高，原子能机构和世界核电运营者联合会收集的安全指标已表明了这一点。图 A-4 示出“动力堆信息系统”数据

---

<sup>15</sup> 关于“核安全”的补充资料可见《2012 年核安全评论》或原子能机构“年度报告”。

<sup>16</sup> 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/English/gc55-14\\_en.pdf](http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC55/GC55Documents/English/gc55-14_en.pdf)。

库中原子能机构汇编的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停堆的总量。<sup>17</sup> 这一指标监测在减少非计划停堆总数方面的实绩，并通常用于表明在改进电厂安全方面取得的成功。如图 A-4 所示，虽然没有像在 20 世纪 90 年代所达到的那样的显著改进，但近几年一直在实现稳步改进。然而，业绩最佳者与最差者之间的差距仍然很大，存在着继续改进的空间。除对福岛第一核电站事故的关注以外，有关交叉性核主题和 2011 年最新安全发展的更详细安全相关资料可见《2012 年核安全评论》。

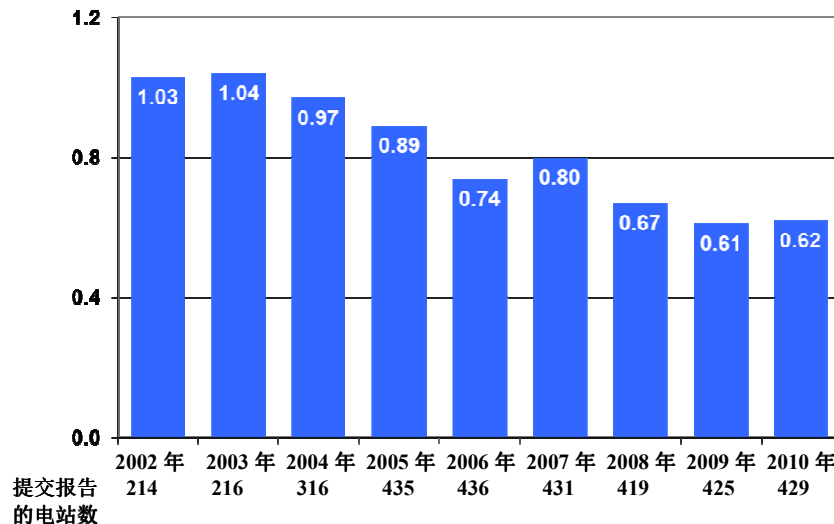


图 A-4. 包括自动和手动停堆在内的每 7000 小时动力堆临界运行发生的非计划停堆的总数（来源：原子能机构）。

## B. 先进的裂变和聚变

81. 现有反应堆的运行经验，加上核科学和工程的进步，不断驱动着新的先进反应堆设计的发展。本节首先概括介绍核裂变反应堆设计的发展，然后介绍核聚变反应堆设计的发展。

### B.1. 先进的裂变

#### B.1.1. 水冷堆

82. 在加拿大，加拿大核安全委员会继续 700 兆瓦（电）增强型坎杜-6 型设计的项目前设计审查，这种设计纳入了对坎杜-9 型设计的若干创新，并考虑了近期在中国和大韩民国所建造的坎杜-6 型机组取得的经验。坎杜能源公司还继续开发先进坎杜反应堆

<sup>17</sup> <http://prisweb.iaea.org>。



(ACR-1000)，这种反应堆采用极高的部件标准化和稍加浓铀，对使用轻水作为一次冷却剂进行补偿。2011年1月，加拿大核安全委员会完成了ACR-1000项目前设计审查的所有三个阶段，使其成为完成了加拿大核安全委员会进行的这种设计审查的首个先进核动力堆。加拿大原子能有限公司正在积极开发坎杜超临界水冷堆，这种反应堆将进一步巩固加拿大在“第四代国际论坛”超临界水冷堆计划中的领导地位。

83. 在中国，有27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设计反应堆岭澳4号机组于2011年5月3日并网发电。中国继续开发CAP-1400设计和CAP-1700设计，它们是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。

84. 在法国，阿海珐集团继续销售1600兆瓦（电）级以上欧洲压水堆并与日本三菱重工合作开发1100兆瓦（电）级以上ATMEA型压水堆，与德国意昂集团合作开发1250兆瓦（电）级以上KERENA型沸水堆。

85. 在印度，有五座反应堆在建，包括三座700兆瓦（电）渐进型加压重水堆和两座1000兆瓦（电）水冷却和水慢化反应堆。印度核电有限公司开发了700兆瓦（电）渐进型加压重水堆。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，该反应堆将使用钍燃料，用重水慢化，在垂直压力管中装入沸轻水冷却剂和采用非能动安全系统。

86. 在日本，两座先进沸水堆正在大间和岛根3号建造，还有一些先进沸水堆处于规划阶段。日立公司继续开发600兆瓦（电）级、900兆瓦（电）级和1700兆瓦（电）级的先进沸水堆以及1700兆瓦（电）级先进沸水堆II。三菱重工针对美国市场开发的1700兆瓦（电）美版先进压水堆（US-APWR）正在接受美国核管理委员会的设计认证。欧版先进压水堆（EU-APWR）也在开发中，将按照欧洲电力公司要求进行评定。此外，日本继续寻求创新型超临界水冷堆设计的开发。

87. 在大韩民国，第一座先进动力堆APR-1400正在按计划建造。继续开发欧版APR-1400（EU-APR-1400），并将按照欧洲电力公司要求进行评定。美国核管理委员会对美版APR-1400（US-APR-1400）的设计认证过程已开始，目标是在2015年实现最终认证。与此同时，2011年继续开发1500兆瓦（电）级APR+和APR-1000。

88. 在美国，2011年12月，美国核管理委员会对西屋AP-1000设计证书修正案作了修正，其中纳入了设计更新和加强措施。

89. 在俄罗斯联邦，继续建造八座水-水动力堆，包括WVER-1000型和WVER-1200型反应堆。继续开发WVER-1200A以及基于当前WVER-1200设计的WVER-600和WVER-1800的计划。此外，俄罗斯联邦还开展了有关创新型超临界水冷堆（WVER-SC）的工作，并继续进行用于专门用途的浮动式小型反应堆KLT-40S的建造。

## B.1.2. 快中子系统

90. 多年来，若干国家都一直在开发快堆，主要作为增殖堆。钚增殖加上燃料后处理和再循环，可以使快堆从铀中提取的能量超过热堆的 60—70 倍，这种能力在长远上能够使核电大幅增加。快堆还能够利用超铀放射性同位素，对某些长寿命裂变产物进行嬗变，从而帮助减少钚库存，和减少高放废物所需的隔离时间。

91. 在中国，65 兆瓦（热）（20 兆瓦（电））池式中国实验快堆 2010 年 7 月 21 日首次达到临界，2011 年 7 月 21 日并网发电。中国实验快堆的物理启动计划正在制订中。

92. 印度卡尔帕卡姆 500 兆瓦（电）原型快中子增殖堆正在顺利建造：安全容器、一回路容器和内容器已完成安装，反应堆厂房已封闭。计划 2013 年初调试。

93. 日本正在开发 1500 兆瓦（电）日本钠冷快堆，作为其“快堆循环技术项目”的一部分，在 2011 年 3 月福岛第一核电站事故后，日本正在重新评价是否继续该计划，预计一旦政府就其修订后的核能政策达成共识，则会就是否继续该项目作出决定。

94. 大韩民国正在开展广泛的研究和发展计划，以支持所谓的“KALIMER”600 兆瓦（电）钠冷快堆。

95. 在俄罗斯联邦，正在别洛雅尔斯克运行目前功率最大的现有商用快堆 BN-600，并继续快堆 BN-800 的建造工作。设想 2014 年完成建造，并在同年开始调试。另外，2010 年，俄罗斯联邦还启动了“2010—2015 年新一代核电技术和直至 2020 年未来趋势”的联邦目标计划，目的是开发一座先进钠冷快堆（BN-1200）和两座创新型重液态金属冷却快堆（铅冷却 BREST-OD-300 和液态铅铋合金冷却 SVBR-100）及其相关燃料循环和一座新型钠冷多用途研究用快堆（MBIR）。

96. 欧洲、日本、大韩民国和俄罗斯联邦最近启动了各种工业计划，目标是到 2025—2030 年使新的示范快堆和原型快堆投入运行。

97. 为了满足欧洲长期能源需求包括供应安全、安全性、可持续性和经济竞争性，欧盟 2010 年 11 月根据“战略能源技术计划”确定了发展快中子堆的技术路径：一是以欧洲以前的钠冷快堆经验为基础，把钠冷快堆作为第一条路径，二是从长远上探究两种可替代快中子堆技术：铅冷快堆和气冷快堆。根据相关示范和实施计划“欧洲可持续核工业倡议”，预计在法国建造钠冷快堆原型堆“ASTRID”，并分别建造两种可替代技术铅冷快堆和气冷快堆的示范堆“ALFRED”和“ALLEGRO”。与这项计划相配套的是，在比利时建造一座快能谱超临界辐照设施“MYRRHA”。该设施也将作为铅冷原型快堆 ALFRED 的一个试验性设施。为测试次临界监测，已建造一座“MYRRHA”零功率模拟堆“GUINEVERE”，目前正在莫尔的比利时核研究中心的实验室运行。

### B.1.3. 气冷堆

98. 在中国，高温气冷示范堆的实施计划 2008 年 2 月获国务院批准。该项目许可证正在审查中。

99. 在日本，完成了对高温工程试验堆的更苛刻试验，试验共持续了 90 天，其中有 50 天温度处于 950°C。日本政府目前正在研究将高温工程试验堆与氢生产系统相连接进行小规模氢生产的可行性。

100. 大韩民国继续投资建造一些试验设施，以便对与氢生产设施相配套的高温反应堆的系统和部件进行工程试验。还计划进行工艺热应用，许多工业热用户正在与核研究界协作，寻找利用高温堆进行热生产和氢生产的最佳办法。拟定 2015 年前选定反应堆概念。“核能产氢开发和示范项目”目前正得到工业界和政府的大力支持。

101. 在南非，由于除其他外，特别是全球金融危机后出现的资金拮据，开展球床模块式反应堆建造阶段的计划停止。该项目仍被置于“看护和维护计划”下，以保护所涉的知识产权和资产，直至政府就今后的行动作出决定。

102. 在美国，继续在爱达荷国家实验室的先进试验堆上，以长辐照期燃料破损率作为测量指标，进行三层各向同性燃料的安全实验。这些试验的目标是提供辐照性能数据，以支持燃料工艺开发；对燃料进行正常运行工况、瞬态工况和事故工况鉴定；支持 PARFUME（颗粒燃料模型）燃料性能及裂变产物释放模拟程序的开发和验证；以及为辐照后检验和安全/加热测试提供三层各向同性辐照燃料。正在继续就第一次燃料实验（AGR-1）的三层各向同性辐照燃料和紧凑试样开展辐照后检验工作和加热测试。第二次燃料实验（AGR-2）2010 年 6 月在先进试验堆开始，目前正在进行中。第三次和第四次实验（AGR-3/4）已合并并在单一实验测试台中进行，并且包括“设计-失效”的三层各向同性燃料颗粒，以提供用以验证仿真模型的裂变产物释放数据以及以较高温度运行的三层各向同性燃料的辐照性能资料。AGR-3/4 于 2011 年 12 月开始在爱达荷国家实验室的先进试验堆进行，现已辐照了两年时间。正在爱达荷国家实验室的先进试验堆继续进行石墨辐照蠕变实验，以提供若干商业级核石墨类型的性能资料。第二次石墨蠕变实验（AGC-2）2011 年 2 月开始在该先进试验堆进行，辐照正在进行之中。AGC-3 的设计审查已经完成，制造工作将于 2012 年完成。“下一代核工厂”项目的资金侧重于继续开展三层各向同性燃料和石墨辐照活动，以及建立促进“下一代核工厂”示范堆设计、许可证审批和建造的公营-私营伙伴关系。

#### B.1.4. 中小型堆<sup>18</sup>

103. 按照原子能机构采取的分类，电功率当量低于 300 兆瓦（电）的反应堆为小型反应堆，电功率当量在 300 兆瓦（电）至 700 兆瓦（电）之间的反应堆为中型反应堆。对于许多拥有小规模电网、基础设施欠缺、投资能力有限或需要灵活生产能源的发展中国家而言，中小型反应堆能够提供有吸引力和可承受的核电方案。小型反应堆对于热电联供和许多未来先进工艺热应用也特别受到关注。

104. 目前，有 13 座中小型反应堆正在阿根廷、中国、印度、巴基斯坦、俄罗斯联邦和斯洛伐克六个国家建造。在包括轻水堆、重水堆、气冷堆和液态金属快堆在内的所有主要反应堆路线，都有中小型反应堆在开发。

105. 在阿根廷，以 2011 年 9 月进行 27 兆瓦（电）CAREM 原型堆场址正挖开始部署 CAREM 反应堆，CAREM 反应堆是一种小型一体化加压轻水堆设计，所有一回路部件被置于反应堆压力容器内，电输出功率为 150—300 兆瓦。

106. 在巴西，开发了不需要厂内换料的 70 兆瓦（电）固定床式核反应堆的概念设计。

107. 加拿大开发并在全球部署了具有各种功率额定值的坎杜堆系列。增强型坎杜-6 反应堆是保留坎杜-6 型设计基本特性的新版，总电容量为 740 兆瓦。

108. 中国开发了 300 兆瓦（电）和 600 兆瓦（电）压水堆。截至 2011 年，已部署若干台机组，两台 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。此外，2011 年 11 月，中国核工业集团公司与漳州市政府签署了两台小型模块式核反应堆建造协议。

109. 在过去的几年中，一直在法国开发“Flexblue”反应堆，这是一种将建在海床上、连接陆上电网的小型海上核电机组，输出功率约为 150 兆瓦（电）。

110. 在印度，有 21 台 220 兆瓦（电）、540 兆瓦（电）和 700 兆瓦（电）级的重水堆在运或在建。304 兆瓦（电）先进重水反应堆目前处于基本设计阶段，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。

111. 日本正在开发“超安全、小而简单”的 4S 型反应堆 — 小型钠冷快堆，设计发电能力为 10—50 兆瓦（电），设在地下一个密封的圆柱形坑室内，而厂房建在地面之上。

112. 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，旨在用于海水淡化。启动了一项中试厂设计项目，以进行综合性能验证。预计 100

---

<sup>18</sup> 原子能机构已出版一份题为《中小型反应堆设计现状》的小册子，可从以下网址下载：  
<http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/files/SMR-booklet.pdf>。其目的是作为“原子能机构先进堆信息系统”的补充，后者可在以下网址获得：<http://aris.iaea.org>。

兆瓦（电）系统一体化模块式先进反应堆在 2012 年第一季度获最后标准设计审批，然后建设原型堆。

113. 在巴基斯坦，有三座中小型反应堆在运，即卡拉奇核电站 1 号（KANUPP-1）、恰希玛核电站一期（CHASNUPP-1）和恰希玛核电站二期（CHASNUPP-2）。从中国为恰希玛核电站三期和四期引进的两台 CNP-300 反应堆正在建造中。

114. 在俄罗斯联邦，六种轻水冷却中小型反应堆正在开发中。两台 KLT-40S 系列机组在建，将安装在驳船上，用于热电联供。俄罗斯联邦还开发了 SVBR-100 型机组，这是一种以铅铋共晶合金为冷却剂、输出功率为 100 兆瓦（电）的小型快堆。

115. 在斯洛伐克，两台基于俄罗斯技术的 VVER-440 型机组正在预计的莫霍夫采核电站 3 号和 4 号建造，有望分别在 2012 年和 2013 年开始运行。

116. 在美国，正在开发四种轻水冷却一体化压水堆：mPower 反应堆、NuScale 反应堆、Holtec 公司固有安全模块式反应堆（HISMUR）和西屋中小型堆。mPower 反应堆是一种由两个 185 兆瓦（电）模块组成的双机组电厂设计，并可根据需要选择增加更多的双机组。NuScale 反应堆对核电厂的设想是：在厂区安装最多 12 个自持型 45 兆瓦（电）模块，并在自然循环条件下以运行工况和事故后工况运行。西屋中小型反应堆是一种融入了非能动安全系统的 225 兆瓦（电）概念设计，它采用了 AP-1000 大型轻水堆设计的一些非能动安全理念和设计特点。HISMUR 反应堆是一种 145 兆瓦（电）设计，与 NuScale 反应堆模块一样，它不需要泵来循环冷却剂。这四种概念预计在 2013 年至 2015 年期间提交美国核管理委员会进行设计认证审查。“国际反应堆的革新与安全项目”目前正在由一个国际集团实施，目的是开发一种电容量为 335 兆瓦（电）的一体化压水堆设计。动力堆革新型小型模块反应堆是一种 311 兆瓦（电）液态金属冷却快中子增殖反应堆，现已开发出来，并正在考虑向美国核管理委员会提交设计认证申请。

117. 若干中小型气冷反应堆设计正在开发中。中国已建造一座球床氦冷高温实验堆 HTR-10。作为后续反应堆，2011 年 3 月，中国政府批准建造由两个 250 兆瓦（热）模块组成的球床模块式高温气冷堆（HTR-PM）。在美国，已完成 150 兆瓦（电）燃气轮机模块式氦反应堆（GT-MHR）的概念设计，它具有通过高温电解或热化学分解水产氢的潜力。最后，正在努力开发一种不经过常规后处理利用乏燃料的能量倍增模块（EM<sup>2</sup>）设计。

#### **B.1.5. “革新型核反应堆和燃料循环国际项目”和“第四代国际论坛”**

118. 旨在支持成员国开发和部署可持续核能系统的原子能机构“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”在 2011 年新增了埃及、以色列和约旦三个成员，使成员数目增加到 35 个。2011 年制订的“2012—2017 年‘革新型核反应堆和燃料循环国际项目’发展构

想”确定了实现全球核能系统可持续性的战略目标，方式包括建立过渡假想方案模型并进行分析，推动必要的技术和制度创新，以及支持成员国制订国家长期核能战略<sup>19</sup>。

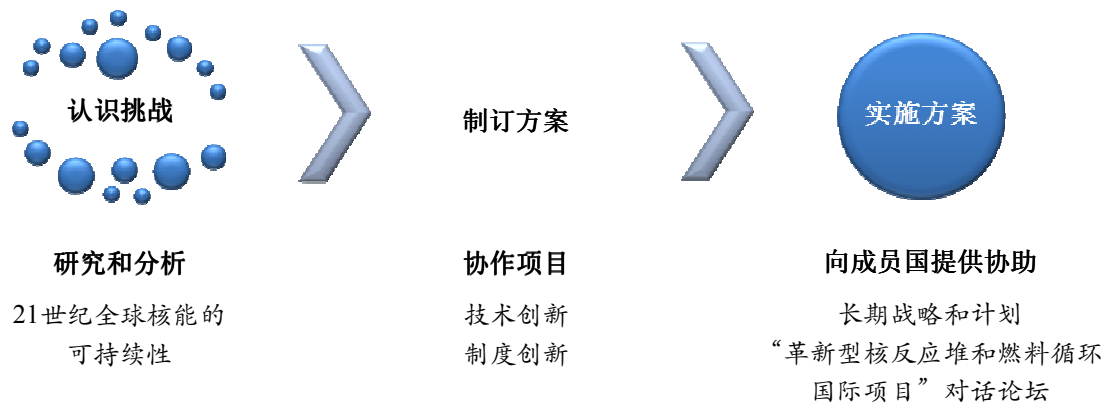


图 B-1. 全球核能的可持续性与“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”的贡献。

119. 2011 年，在“‘革新型核反应堆和燃料循环国际项目’核能创新对话论坛”下启动了一个新的项目，以确定“用户的共同考虑”，特别是中小型反应堆技术用户的考虑。也是在 2011 年，分别在白俄罗斯、印度尼西亚、哈萨克斯坦和乌克兰开展四次“核能系统评定”，对原子能机构为支持各国自评定而开发的“核能系统评定支持包”进行了扩大，以包括样本数据和“核能系统评定”电子软件。2011 年，完成了“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”协作项目“基于包括闭合核燃料循环的热堆和快堆的革新型核能系统总体结构（革新型核能系统总体结构）”。该项目确定和量化了向基于快堆和闭合燃料循环的全球可持续核能系统过渡的好处。作为一个后续项目，2011 年，启动了“促进可持续性的核能地区组相互协同作用评价”，目的是详细量化各国之间在这一过渡过程中的协作和协同的好处。

120. “第四代国际论坛”通过系统性合同和协议，对 2002 年选取并在“第四代核能系统技术路线图”中说明的以下六类下一代核能系统的研究活动进行协调：气冷快堆、铅冷快堆、熔盐堆、钠冷快堆、超临界水冷堆和超高温反应堆。所选取的这六类系统采用各种反应堆、能量转换和燃料循环技术。它们的设计特点包括热中子谱和快中子谱、闭合燃料循环和开式燃料循环以及从很小到很大的各种反应堆规模。依各自的技术成熟度的不同，预计这些系统将在 2020 年至 2030 年期间或以后时期可供商业使用。“第四代国际论坛”目前有 13 个成员。<sup>20</sup>

<sup>19</sup> 本出版物可在以下网址获得：[http://www.iaea.org/INPRO/files/INPRO\\_Development\\_Vision\\_\(Final\).pdf](http://www.iaea.org/INPRO/files/INPRO_Development_Vision_(Final).pdf)。

<sup>20</sup> 阿根廷、巴西、加拿大、中国、欧原联、法国、日本、大韩民国、南非、瑞士、俄罗斯联邦、英国和美国。

121. 原子能机构与“第四代国际论坛”在以下领域开展合作：风险与安全；抗扩散和实物保护；经济评价模拟和方法学；以及中小型反应堆、钍利用和燃料循环的影响等其他专题。2011年，“第四代国际论坛”/“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”第五次接口会议重申了“第四代国际论坛”与“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”之间的合作，特别是有关钠冷快堆的抗扩散评价方法和安全问题的合作。

## B.2. 聚变

122. “国际热核实验堆项目”是一个为了论证和平利用聚变能的科学技术可行性和安全特性的实验项目。中国、欧洲联盟、印度、日本、大韩民国、俄罗斯联邦和美国参加了这一国际合作项目。国际热核实验堆在迅速发展，不仅体现在现场施工密集，而且各种器件和设施部件的采购包数量不断增加。2011年国际热核实验堆场址施工进度包括完成了热室厂房、组件大厅正挖、托卡马克综合设施混凝土堆坑抗震地基和极向场线圈绕组设施。截至2011年底，126项采购安排中，共有65项已签署，总额超过30亿欧元，占国际热核实验堆建设总采购值的74%。主要部件（例如真空容器）的制造和重要配件（例如环向场超导体）的生产正在国际热核实验堆的成员国家进行。然而，仍需要采取行动，以便尽可能减少2011年3月日本地震和海啸造成的项目进度拖延。

123. 在开展“国际热核实验堆项目”的同时，国际社会还致力于开发利用磁约束聚变生产电力的路线图。这些活动的重点是研究建立聚变示范动力厂所涉及的科学技术问题及实现该厂的必要研究和开发。已确定需要国际社会进一步关注的一些战略性重要问题，包括：

- 聚变设计程序中使用的假设 — 聚变反应堆设计主要取决于设计阶段采用的物理假设和技术假设；
- 聚变材料的开发 — 辐照试验是必需的，可决定聚变示范动力厂所用结构材料和第一壁材料的主要开发路径；
- 包层的开发 — 氦的自足性是除国际热核实验堆外进行聚变开发的一个必要条件，基本而言，任何下一步聚变核设施，不管预计用于何种目的，都将需要增殖包层；
- 处理等离子体耗尽的解决方案 — 高占空因子聚变装置的热和粒子耗尽要求远远超出国际热核实验堆的要求；
- 各种下一步设施方案的要求 — 需要制订一项计划，及时弥补主要聚变技术的准备不足和满足开发需求，以支持设施的如期建设。

124. 这些问题具有战略重要性，因为处理这些问题的方式将对总体路线图产生强烈影响。然而，国际聚变界尚未就这些问题达成协商一致。

125. “第二十四届国际原子能机构聚变能会议”将于2012年10月8日至13日在美利坚合众国圣地亚哥举行。



图 B-2. 正在起吊国际热核实验堆使用的超导校正场线圈，中国合肥等离子体物理研究所。

## C. 加速器和研究堆的应用

### C.1. 加速器

126. 基于加速器的中子源，如散裂中子源设施中的中子源，在过去几十年中一直被用来作为研究堆的补充。目前，中国和瑞典正在设计和建造新的散裂中子源设施。在中国，2011年10月20日举行了中国散裂中子源的奠基仪式，该中子源将主要包括一个H型直线加速器和一个质子快速循环同步加速器。预计中国散裂中子源将需要七年完成建造，预定开始调试和开始运行的时间分别为2016年和2018年。在瑞典，欧洲散裂源正在建造之中。欧洲散裂源设在瑞典隆德，丹麦是其共同东道国，并由17个欧洲国家合作提供资金和运行。目前，正在进行技术设计审查，该设计将作为定于2013年开工的欧洲散裂源的建造蓝图。预计欧洲散裂源将于2019年投入运行，该设施将为许多研究领域从事主体材料分析和分子级材料分析的研究人员开创新的机会。这些领域包括：冶金学；材料科学，包括纳米材料和用于能源研究的新型材料；考古学；环境工程学；食品技术以及化学、生物化学和医药科学。

127. 2011年3月的日本地震和海啸给日本质子加速器研究设施造成了严重影响。2011年，对造成的破坏进行评定和修理，此后，预计该设施将恢复运行。

128. 世界各地正在建造新的同步加速器设施，以满足科学界日益增长的需求。目前正在瑞典隆德建造第三代同步加速器设施MAX IV，已计划在2014年对建造完成后的设施进行调试。该设施的设计还包括一个处于第二开发阶段的自由电子激光装置的选项。此外，西班牙的ALBA同步加速器光源设施在2011年期间首次进行了束调试，预计将在2012年早些时候迎来第一批用户。

129. 第四代基于自由电子激光装置的设施即意大利的FERMI@Elettra、德国的XFEL和瑞士的SwissFEL都取得了显著进展。FERMI@Elettra在2011年春季进行调试后，



能够产生波长区域为 10—100 纳米的极短脉冲（持续时间低于 10—15 秒）。飞秒激光装置的出现已给从固态物理学到生物学的许多科学领域带来了革命。超高速真空紫外线和 X 射线科学的这一新研究前沿正在推动产生新型飞秒脉冲源的发展。

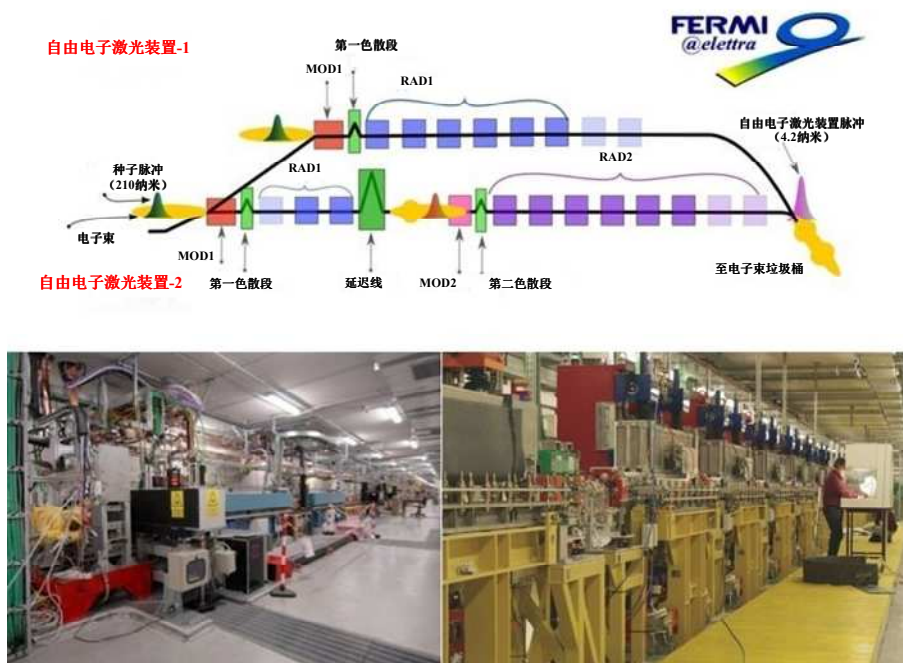


图 C-1. FERMI 自由电子激光装置示意图和设施内景（照片来源：FERMI@Elettra）。

130. 国际协作在离子束应用领域发挥着关键作用。这种协作的一个例子是由欧盟提供资金的 CHARISMA（文化遗产先进研究基础设施：协同促进多学科保护/恢复方案）项目。该项目将欧洲著名博物馆（如普拉多博物馆、大英博物馆）、研究实验室（如法国同步加速器设施 Soleil）和大学研究小组的工作汇集在一起，以便共享对先进设施的利用、发展文化遗产保护技术和向年轻研究人员提供培训。包括传统和先进分析技术在内的若干方法被用于研究人工制品如绘画、雕塑、金属制品、陶瓷、手稿和印刷书籍、考古文物及其他物品的主体特性、显微特性和表面特性。

## C.2. 研究堆

131. 在过去的五年中，许多成员国对核能或其他核技术的兴趣扩大，这包括反应堆生产的医用和工业用同位素和利用核技术寻求发展先进科学。因此，研究堆正在日益成为发展国家或地区核基础设施的重要组成部分。<sup>21</sup> 此外，随着原子能机构与成员国通过建立以一个或多个设施为中心的国际联盟来合作提高设施的可持续性，出现了增加利用和整修老旧研究堆的趋势。

<sup>21</sup> 更多资料可见大会 GovAtom/GC 网站所载《2012 年核技术评论》的相关附文。

132. 2011 年底，全世界共有 672 座研究堆设施，其中 232 座正在运行，13 座被暂时关闭，211 座被永久关闭，213 座已经退役，3 座正在建造中。<sup>22</sup> 另外，制订了两个项目规划和取消了五个项目。根据与原子能机构进行的初步讨论，14 个成员国（在下文详述）正在考虑建造新研究堆或正在制订新研究堆计划。对于这些成员国中的许多国家，这是核电与核技术的其他和平应用并行引进的国家计划的早期步骤。实际上，阿塞拜疆、沙特阿拉伯、苏丹和突尼斯正处于计划建造作为更大国家核电计划组成部分的研究堆的早期阶段。约旦已开始建造一座 5 兆瓦多功能研究堆，而越南的一个项目的目的是建造一座为国家核电计划提供支持的新研究堆。已经拥有核研究堆的国家，包括阿根廷、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供用于特定实验和商业用途的新研究堆。

133. 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到 2020 年预计将降到 100 至 150 座之间。将需要更多地开展国际合作，以确保对它们的广泛利用和高效使用。国际合作网络还正在证明有助于提升现有设施和发展新的设施。因此，除波罗的海、加勒比（包括来自拉丁美洲的参与）、中非、中亚、东欧和地中海地区现有的六个研究堆联盟外，已设想而且有必要建立新的联盟和网络，以加强研究堆的利用并使余下的反应堆变得切实可行。在这方面，原子能机构还在帮助成员国建立能够协作开展常见运行和维护活动的研究堆设施主题网络，包括制订实施原子能机构“研究堆运行和维护评定”服务的方法学。“研究堆运行和维护评定”工作组访问的主要目的是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让。该网络还将为共享与研究堆老化管理有关的信息提供支持，协作开展相关协调研究项目，分担共同的挑战和开展联合活动。

134. 2011 年 11 月 14 日至 18 日在摩洛哥拉巴特举行的“研究堆安全管理和有效利用问题国际会议”广泛讨论了研究堆当前面临的关键问题和挑战。原子能机构组织的这一研究堆相关主要活动每四年举办一次。最近一次会议的结论除其他外特别是认为，研究堆联盟提供了通过多个反应堆提供单个反应堆不能提供的产品和服务的机会，因此，成员国应当在可能的情况下利用这些联盟。会议的另一个重要结论是，正在制订研究堆计划的成员国应当利用原子能机构的“里程碑方案”，并且应当确保落实适当的利用计划及安全和监管基础结构。研究堆设计者和提供者目前提供广泛类型的研究堆和配套设施，会议建议对这些研究堆和配套设施采取“通过设计实现安全”方案，并尽一切努力最大程度纳入安全和效率参数包括从福岛第一核电站事故中汲取的教训。此外，根据原子能机构利用调查表开展的调查结果，会议注意到，三分之二的参加研究堆设施已针对福岛第一核电站事故采取了一些行动。会议建议，研究堆营运者积极地重新审查其设计基准和安全分析，以便评价应当作出哪些与场址和设施特性相适宜的变更和改进，从而使设施能够承受多重严重外部事件。

---

<sup>22</sup> 根据原子能机构“研究堆数据库”提供的资料（<http://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/>）。

135. 由美国主持的“减少全球威胁倡议”在 2011 年全年继续履行使命，最大程度减少高浓铀在民用核部门的存在，包括将研究堆燃料和用于放射性同位素生产的靶件从使用高浓铀转换为使用低浓铀。2009 年，“减少全球威胁倡议”的范围从 129 座研究堆扩展到涵盖全世界约 200 座使用高浓铀燃料运行的反应堆。截至 2011 年底，其中的 76 座反应堆已经转换为使用低浓铀燃料或在转换前被关闭。最近的一个例子是越南的研究堆，该研究堆在 2011 年 11 月 30 日使用 72 个低浓铀燃料元件实现了临界，完成了于 2008 年开始进行的将该反应堆堆芯从使用高浓铀转换为使用低浓铀的工作。

136. 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。2010 年，非常成功地完成了向俄罗斯联邦返还燃料的工作，从塞尔维亚温萨向俄罗斯联邦运回了 2500 千克乏燃料。返还努力在 2011 年继续顺利进行，其中许多是在其他成员国完成的。与乌克兰的哈尔科夫研究所签署了在 2012 年 3 月之前将其最后的近 224 千克新鲜高浓铀燃料库存返还俄罗斯联邦的三方合同。中国继续努力将该国的微型中子源反应堆（微堆）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。墨西哥政府在 2011 年 8 月和 11 月分别签署了将该国的铀氢锆研究堆转换为使用低浓铀和向美国返还燃料的协议。2011 年 12 月进行了第一批装运工作，2012 年 2 月完成了返还工作。

137. 医用同位素生产工艺从使用高浓铀向使用低浓铀的转换在 2011 年也继续进行，并取得了显著进展。由于用于靶件辐照的老化反应堆和铀靶件加工设施的经常和意外关闭，成员国自 2007 年底至 2010 年第三季度发生了严重的钼-99 短缺。随着反应堆和生产设施恢复运行以及新的生产商加入规模相对较小的供应商行列，短缺情况在 2011 年出现缓解，生产商恢复了钼-99 靶件从使用高浓铀向使用低浓铀的转换。澳大利亚报告其提高基于低浓铀的钼-99 产量的努力取得了进展，2011 年 11 月，埃及确认在使用低浓铀靶件生产钼-99 方面进行了成功的辐照和调试试验。南非继续进行用低浓铀靶件制造的钼-99 的商业生产，而两个主要的医用同位素生产国比利时和荷兰也开始制订和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。此外，2011 年，原子能机构完成了为期六年的协调研究项目，该项目协助七个成员国（智利、埃及、哈萨克斯坦、利比亚、马来西亚、巴基斯坦和罗马尼亚）开展了努力，以评定使用基于裂变的低浓铀或使用中子活化方法在本国生产小规模钼-99 供应的可行性。最后，对基于加速器技术的替代钼-99 生产路线的研究在 2011 年期间取得一些良好势头，并有可能在今后几年中继续发展。

138. 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 2011 年在铀-钼燃料的开发和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的目标。

## D. 粮食和农业

### D.1. 动物生产和健康

139. 联合国粮食及农业组织大会 2011 年 6 月通过了宣布全球已根除牛疫的决议。原子能机构在 2011 年 9 月大会第五十五届常会期间对这一里程碑事件进行了庆祝。通过发展和利用诊断试验方法，核和核相关技术对根除牛疫作出了重要的贡献。特别是在监测接种运动和牧群疾病状况以及在对牛群进行监视以确认已无该疾病方面，能够检测特定牛疫抗体以及病毒的测试技术即酶联免疫吸附测定（酶免测定）技术发挥了至关重要的作用。该技术基于以往开发的采用磷-32 和硫-35 作为次级抗体标记物的放射性同位素抗体标记技术。目前的酶免测定系统采用经过辐照的成分（血清和抗原）消除潜在传染原的活性，以确保血清测试的安全性。这些技术对于防治其他跨境动物疾病同样具有相关性。

140. 利用常规外在标记物或卫星技术（响铃或发射器标记技术）对野鸟迁徙路线的传统跟踪方法只能提供作了如此标记的有限数量野鸟的信息。2011 年，稳定同位素示踪技术被证明可以提供所捕获的或已死亡的每只鸟的信息。这已证明在禽流感的流行病学调查（追踪到爆发源头）方面极为有益，因为该疾病很容易在相对较短的时间内通过长距离传播开来。人们越来越有兴趣不依赖面向贸易的动物产品的进出口所需的法定文件，而利用该技术追踪其来源。具体就鸟类而言，根据鸟类的迁移和营养模式，其羽毛、脚爪和喙的稳定同位素剖面可能各不相同，这就使得可以确定其迁徙路线。2011 年进行了“概念验证”，2012 年将通过一个协调研究项目开展研究活动，以便将从稳定同位素剖析中取得的数据与从环境样品（粪便、天然蓄水池）病毒检测和基因条形码编码中取得的数据加以融合。这将使得能够利用更灵活的取样战略同时发现迁徙路线、所涉鸟类及其携带状况。

141. 与细菌（流产布鲁氏菌、李司忒氏菌）、原虫性疾病（环形锥虫病、日本血吸虫、疟原虫、小泰勒尔梨浆虫）、寄生虫（胎生网尾线虫、丝状网尾线虫）病原体伽玛辐照疫苗方面取得的大有希望的结果相对照，生产经过辐照的病毒疫苗问题仍未得到充分的考虑。澳大利亚阿德莱德大学分子和生物医学学院的科学家们在 2011 年 4 月在奥地利维也纳原子能机构总部举行的专家会议上介绍的结果表明，伽玛灭活流感疫苗比常规（灭活或弱菌）疫苗所引起的免疫反应要广泛得多。这包括 T 细胞和 B 细胞介导的免疫，而常规疫苗主要仅引起 B 细胞介导的免疫。而且，这种疫苗显示不同流感亚型之间具有交叉反应性，从而扩大了保护范围。预计在不远的将来，对利用辐照生产病毒疫苗（供用于口蹄疫、裂谷热、流感和其他病毒性病原体）的可行性的进一步研究可能为改进防治某些动物疾病的战略作出显著贡献。

142. 作为对 2011 年福岛事故的响应，原子能机构一直致力于改进用于核或放射紧急情况下食品污染样品采集、分析、判读和决策的软件。该软件是作为参照完整性数据库设计的，以便在样品采集/报告过程中利用独特的数字将各个参数相互联系起来。因

此，设计概念是该软件将能够实时产生众多用户自定义报表。此外，还为成员国制作了综合信息包，以协助成员国实施与动物产品和其他农产品相关的补救措施。该软件一旦完成将起到一个平台的作用，以指导成员国升级各国的应急计划以及加强核事故后的农业对策。

## D.2. 水土管理

143. 到 2050 年，全球人口预计将达到 90 亿，即在 39 年的时间内增加近 20 亿人。这意味着对水的需求估计将增加 50%。农业目前利用了世界陆地 11% 的表面进行作物生产，其用水量占到了从含水层、溪流和湖泊所提取的全部水量的 70%。根据现有的农业用水效率和增产效益趋势，据预测，将需要通过提高农业用水效率以及改进农业景观中水质保护实践来满足这种需求。核技术的进步可以帮助应对这些挑战。

### D.2.1. 利用稳定同位素评估漫灌系统中水的流失及其盐度影响

144. 最近的研究<sup>23</sup>表明，漫灌期不同阶段水同位素特征变化测量可用于评估不同土壤类型和灌溉率下由蒸发和蒸腾方式引起的农地水流失情况。该方案基于以下原理，即较轻同位素（氢-1 和氧-16）的水分子在蒸发期间比较重同位素（氘和氧-18）的水分子更容易离开液体表面，从而引起剩余的水与较重的同位素浓缩在一起。这些研究还证明，长期监测灌溉水、土壤水和地下水中的氘、氧-18 和氯化物浓度可以有助于评定蒸发和蒸腾对漫灌系统下土壤盐度发展的影响。从澳大利亚 2011 年四个研究场所取得的结果表明，蒸腾是水流失的最主要原因，因此也是按漫灌期间 14 天研究期内土壤盐浓度增加情况所测得的盐度影响的最大促进因素。蒸腾引起的盐度影响（0.4 至 2.6 吨盐/公顷）比从灌溉水和土壤水中蒸发引起的盐度影响（0.01 到 0.3 吨盐/公顷）大 3 到 50 倍。

### D.2.2. 利用宇宙射线中子进行大面积土壤水分测量

145. 关于大面积土壤含水量的资料有益于评估各种作物的需水量，并因此有助于安排进行大规模灌溉、作物产量预测和气候变化研究。取得这种测量值在过去一直是一项挑战，因为大多数可用的装置进行土壤水分检测的范围很小：离装置直径 0.05—1 米范围内。其结果是需要进行大量的测量，而这可能既耗时又代价昂贵。澳大利亚和美国最近发展的宇宙射线中子方案代表了一种突破。<sup>24</sup> 该技术涉及对从宇宙射线中天然产生的快中子以及由于与地表或近地表存在的水碰撞从土壤中产生的快中子进行测量，从而使得能够绘制涵盖大部分作物生根带的直径近 700 米、深度达 70 厘米区域的土壤水分状态图。因此，这种新仪器可以对点测量装置如土壤水分中子探针进行补充，从而

---

<sup>23</sup> 范登奥凯尔等人：“漫灌条件下蒸发和蒸腾引起的盐度影响”。《灌溉与排水工程期刊》第 137 期（2011 年）：1-11。

<sup>24</sup> D.德西勒茨等人，《天然中子探测：在不易把握的宇宙射线范围研究地表水文学》。《水资源研究》第 46 期（2010 年）：W11505, doi:10.1029/2009WR008726。

产生全领域水平土壤含水量的可靠测量值。此外，这种技术所用的被称作“宇宙射线土壤水分观测系统”的宇宙射线中子探测器十分结实，可以很容易地搬到现场，并可纳入比土壤水分中子探针所覆盖的大 1000 倍区域的土壤水分数据。因此，对于大面积土壤水分测量而言，“宇宙射线土壤水分观测系统”技术耗时更少，也更经济。该技术还可用于评价大规模灌溉系统的布水均匀性和效率。



图 D.1. 安装在澳大利亚一座牧场的“宇宙射线土壤水分观测系统”（照片由英联邦科学和工业研究组织克里斯·史密斯博士提供：土地和水，堪培拉）。

### D.2.3. 钷（钷-239 和钷-240）— 散落放射性核素在土壤侵蚀和土地退化评定中的潜在利用

146. 最新研究<sup>25</sup>、<sup>26</sup>已经表明，发射  $\alpha$  射线的钷同位素钷-239 和钷-240（半衰期分别为 24110 年和 6561 年）可用于跟踪土壤和沉积物在水体中的运动。这些同位素与铯-137<sup>27</sup> 的类似之处在于，它们都是核武器试验所产生的散落放射性核素，而且通常存在于大多数土壤中，因此没有必要用同位素来对土壤作标记。但钷-239 和钷-240 比铯-137 的主要优势在于这两个钷同位素的半衰期比铯-137（30 年）的半衰期长，从而确保了钷作为土壤移动和沉淀的示踪剂的长期可利用性。还需要开展进一步的研究，以便在广泛的农业生态条件下对这些同位素进行测试。

---

<sup>25</sup> S.G.蒂姆斯等人：“钷作为赫伯特河中土壤和沉积物移动示踪剂”，澳大利亚。《物理学研究中的核仪器和方法》B 部分，第 268 卷（2010 年），第 1150 页至第 1154 页。

<sup>26</sup> W.T.胡等人，2011 年：“利用沉降物钷作为侵蚀评定所用的探测物”。《环境放射性期刊》第 102 期（2011 年），第 937 页至第 942 页。

<sup>27</sup> V.祖潘茨和 L.马比，2010 年。“对侵蚀和沉积过程评定提供核技术支持：在斯洛文尼亚利用铯-137 作为土壤示踪剂的初步结果”。《Dela》第 33 期（2010 年），第 21 页至第 36 页。

### D.3. 用于减轻辐射污染影响的农业治理实践和技术

147. 针对辐射污染的农业对策是 1957 年在前苏联马雅克燃料后处理厂发生克什特姆事故后才首次大规模实施的<sup>28</sup>。这些实践经过了修改、进一步发展并在受 1986 年切尔诺贝利事故影响的地区进行了实施。在开展土壤性质评定的基础上，为可耕土壤和牧场提出了关于新农业治理行动的建议（图 D.2.）。还制订并在受事故影响地区大规模实施了最大程度减轻动物产品污染的有效对策，如在动物饲料中添加特定放射性核素粘合剂（如六氰高铁酸铵，以减少草食动物肠道对放射性钙的吸收）、添加稳定类似物如钙以抑制放射钙的吸收、进行清洁喂养和对动物进行实时监测。



图 D.2. 在乌克兰罗夫诺地区耶尔尼定居区湿泥草甸上实施基于土壤的补救方案（照片由基辅市乌克兰农业放射学研究所提供）。

148. 其结果是取得了关于农业对策有效性的大量数据以及关于所需资源和成本等附带因素的资料，并对其进行了分析。此外，还为确定影响各种补救方案潜在适用的许多其它因素作了大量努力。这些因素有：不同的环境条件；放射性核素性能；受污染区的土地利用；当地农民和利益相关者已经有效实施的补救实践。所有这些因素都可能对农业对策的有效性产生很大的影响。原子能机构最近在切尔诺贝利论坛报告<sup>29</sup>中以

<sup>28</sup> R.M.亚历克斯奥金，“辐射事故和事件后被污染区域的治理”，《受污染环境治理》（G.福格特和S.费先科编辑），爱思唯尔出版社，阿姆斯特丹（2009年），第四章，第177页至第222页。

<sup>29</sup> [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1239\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1239_web.pdf)。

及在原子能机构与其它国际组织进行的一些后续评审中对这些结论和所汲取的经验教训进行了严格的评审<sup>30</sup>。

149. 对大片农地产生很大影响的日本 2011 年福岛事故提出了新的挑战。虽然克什特姆事故和切尔诺贝利事故后有效利用的许多方案（基于土壤的措施和农用化学补救措施）正在进行试验并且正在福岛地区部分地得到实施，但受影响地区的特定状况要求采取新的方案，以确保食品安全和可持续农业生产。尤其建议利用新技术对受淹稻田进行治理。

150. 众所周知，传统的表土移除产生大量废弃土壤。在日本，对将土壤固化剂用作更容易地移除较浅层表土的方法进行了试验（图 D.3.）。这一技术的好处是使得能够更快速和更高效地去除受污染土壤中的放射性（80%以上）。进行这种治理所需的时间每公顷最多 10 天，包括在施用固化剂溶液后让表土固化的时间。



图 D.3. 施用土壤固化剂后的表土移除试验（照片由日本农林水产省/日本原子力开发机构)/日本国家农业和食品研究机构提供）。

151. 在日本正在试验的另一种新技术是专为受淹土壤（如水稻田）设计的。土壤中的放射性水平通过以下方式得以降低：将受淹条件下薄薄的一层表土捣成泥浆，排尽悬浮土壤（粘土及轻质淤泥部分）中的水，将沉淀物从水中分离出来，最后仅处置沉淀物（图 D.4.）。

---

<sup>30</sup> S.V.费先科、R.M.阿历克斯奥金、M.I.巴隆诺夫、I.M.德维奇、B.J.霍华德、V.A.卡斯帕罗夫、N.I.桑扎洛娃、A.V.帕诺夫、G.沃伊特、Y.M.茹琴科，“切尔宁贝利事故后农业对策 20 年扩展审查”，《整体环境科学》第 383 期（2007 年），第 1 页至第 24 页。





图 D.4. 日本将排尽稻田里悬浮土壤中的水作为一种治理方案（照片由农林水产省-国家农业和食品研究机构提供）。

152. 对于降低土壤中放射性铯的浓度和外部剂量率而言，根据 2011 年在福岛县的一个试验场地所作的观察，该技术的效率在 15%至 70%之间，取决于土壤性质，即粘土和腐殖质含量。应当指出的是，比起基于传统移除 4 厘米表土层的技术，该技术所产生的废物少于 30 倍。因此，该方法最大程度减少了土壤肥力的恶化。

#### D.4. 昆虫不育技术伽马辐照的替代方法<sup>31</sup>

153. 作为虫害防治计划一部分的昆虫不育技术传统上一直使用产生伽马射线电离辐射的钴-60 或铯-137 辐照器。但是，针对放射性同位素跨境运输在物流上日益加剧的复杂性和困难，已开始努力探索用于虫害防治计划的其他昆虫不育方案。在血液辐照医学研究单位运行的自持型低能 X 射线辐照器仅在打开电源且能量在几百千电子伏范围内时才发出 X 射线，因此，比伽马辐照器所需的屏蔽要少得多。

154. 进行了不育试验，以比较钴-60 或 X 射线对昆虫的影响。有关残留繁殖力、成虫产生率以及伽马射线和 X 射线处理过的雄虫之间为了野外笼中有繁殖力的雌虫开展竞争的交配竞争力的资料迄今没有披露任何显著差异。已向原子能机构若干成员国提供了纳入验证阶段所确定的所有修改的机器。但还需要若干年的时间才能收集到足够的的数据，以确认这确实是在常规大规模作业条件下对昆虫进行绝育的切实可行的替代方案。

---

<sup>31</sup> 可从大会 GovAtom/GC 网站《2012 年核技术评论》的相关附文中获得更多资料。

## E. 人体健康

### E.1. 营养学

#### E.1.1. 儿童最初一千天期间的发育质量影响其生命以后阶段的健康

155. 人们日益认识到，在生命中从受孕到两岁的最初一千天期间的适当营养对儿童的发育和学习能力以及在生命的以后阶段罹患糖尿病和心脏病等慢性疾病的风险具有深远的影响。<sup>32</sup> 用于评定儿童发育的当前标准主要基于体重和身长或身高（日内瓦世卫组织，2006年<sup>33</sup>和2011年<sup>34</sup>）。健康专业人员可利用以年龄标准体重和身长或身高形式示出正常发育状况的图表来监测儿童的发育情况。虽然这些人体测量量度是基本必需的，但有必要对健康发育进行定义，以便包括“发育质量”的量度。健康发育与瘠瘦组织的发育有关，而过多的体脂肪与人成年后罹患非传染性疾病的风险增加相关。但是，目前并没有有关儿童身体组成的标准。

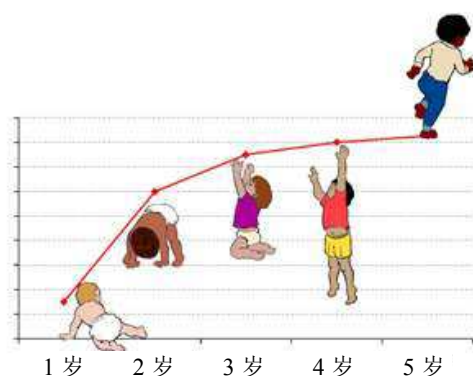


图 E.1. 取自世卫组织《儿童发育标准》的图片，图中示出儿童在其生命的最初五年生长发育情况。这些标准基于成长于迥然不同种族背景和文化环境（巴西、加纳、印度、挪威、阿曼和美利坚合众国）的约 8500 名母乳喂养健康婴儿和儿童的（身高、体重、年龄）数据。（世卫组织版权所有，2006 年）。

156. 对于许多转型期国家，儿童体重的增加与身高的增长不相称，其结果是，如果衡量身高，正常体重的儿童越来越多地被确认为个矮和相对肥胖。这引起了对“发育质量”的关切。类似体重或身高的婴儿在身体组成上可以有很大的差别。例如，与欧洲

---

<sup>32</sup> 见 1000 天网站：<http://www.thousanddays.org/>。

<sup>33</sup> 世卫组织多中心发育基准研究小组。世卫组织儿童发育标准：年龄标准身长/身高、年龄标准体重、身长标准体重、身高标准体重和年龄标准身体质量：方法和发展情况。日内瓦：世界卫生组织（世卫组织），2006 年。见：[http://www.who.int/childgrowth/standards/technical\\_report/en/](http://www.who.int/childgrowth/standards/technical_report/en/)。

<sup>34</sup> 世卫组织 Anthro 软件（2011 年 1 月 3.2.2 版）：评定世界儿童生长和发育软件。见：<http://www.who.int/childgrowth/software/en/>。

新生儿相比，印度婴儿出生时又小又瘦，但他们具有较多的体脂肪而且在以后的成人期罹患非传染性疾病的风险较大。<sup>35</sup> 很显然，尽管身高和体重的量度提供了有益的信息，但有必要评定促进体重的成分，特别是非脂肪量与脂肪量的相对比例。

157. 稳定同位素稀释等核技术为监测人体组成相对较小的变化提供了敏感性和特异性方面的优势，可用于例如评价旨在防止严重营养不良与肥胖症和相关慢性疾病共存的营养相关疾病双重负担的营养学干预计划。<sup>36</sup>

158. 在智利，一直利用稳定同位素技术来评定旨在降低学龄前儿童肥胖率的国家干预计划。定期去国家日间护理中心的 2—3 岁儿童的肥胖率已从 10.4% 降低到 8.4%。由于认识到早期干预的必要性，2011 年制订了一项新计划，其中将利用稳定同位素技术验证针对 6—24 个月儿童的“运动发育和体育活动促进计划”。

159. 原子能机构与国际专家密切协作，于 2011 年编写了关于评定婴幼儿身体组成所用技术的标准化的导则。<sup>37</sup> 这些导则为制订利用核和非核身体组成评定技术评价婴幼儿发育和营养的标准提供了至关重要的第一步。

## E.2. 辐射医学在癌症治疗方面的进步

### E.2.1. 现代放射治疗需要对质量数据进行管理

160. 过去十年来，辐射肿瘤学技术已变得越来越更加复杂和计算机化。一些辅助治疗器和配件以前靠手动插入辐射束以便有意改变其注量（密度）并以此实现治疗的最优化，而现在也作为数字装置提供使用。例如，辐射束形目前经常通过多叶片准直器来确定，该仪器不仅确定辐射场的形状，而且在治疗期间还可以在辐射场范围内移动。由于确定每位放射治疗患者治疗情况的参数的数量，现已不再可能靠手动安排和实施这类复杂的治疗。因此，患者的电子记录实属必要。这些记录中内置的不仅是患者的护理详情、辐射处方和辐射剂量记录，而且还有确定每位患者辐射场的所有参数的详细资料。分级密码控制安全措施很有必要，以确保这些记录不被毁坏和载有正确的资料来保证在通常需要数周时间的放射治疗疗程中每天重复性地实施治疗。

161. “记录与核实系统”是一种类型的放射治疗患者数据库管理系统，该系统是大多数现代化数字放射治疗部门的核心系统。这类系统将所有放射治疗成像、治疗计划和

---

<sup>35</sup> 《新生儿人体测量：瘦但多脂肪的印度婴儿》，YAJNIK, C.S.等。《普内产妇营养研究》，《国际肥胖及相关代谢性疾病杂志》2003 年第 27 卷第 2 期第 173—180 页。

《亚洲人适当的体质量指标及其对政策和干预战略的影响》，世界卫生组织，《柳叶刀》杂志 2004 年第 263 期第 157—163 页。

<sup>36</sup> 《发育模式和早期饮食对发展中国家婴幼儿肥胖症和心血管风险因素的影响》，CORVALAN, C. 等，《营养学会论文集》2009 年第 68 卷第 3 期第 327—337 页。

《健康与疾病的发育起源假说如何能够促进改善发展中国家的健康？》，UAUY.R.,KAIN, J.和 CORVALAN,C.,《美国临床营养学杂志》2011 年第 94 卷第 6 期第 1759S—1764S 页。

<sup>37</sup> 《从出生到两岁婴幼儿身体组成评定》（印刷中），国际原子能机构。

治疗实施设备联系在一起（见图 E.2.）。放射治疗设备往往由不同的供应商提供，因此，遵守共同数字通讯协议对确保跨所有界面数据传输的完整性是必要的。传统上，所有放射治疗设备都要受制于严格的质量控制程序，以确保所有模式适当地运作。但是，一直缺少关于“记录与核实系统”的验收测试和系统质量保证的国际导则。为了促进安全和有效的患者治疗，原子能机构在 2011 年编写了关于“记录和验证系统”良好质量管理的导则，该导则得到了所有放射治疗设备主要供应商的认可。

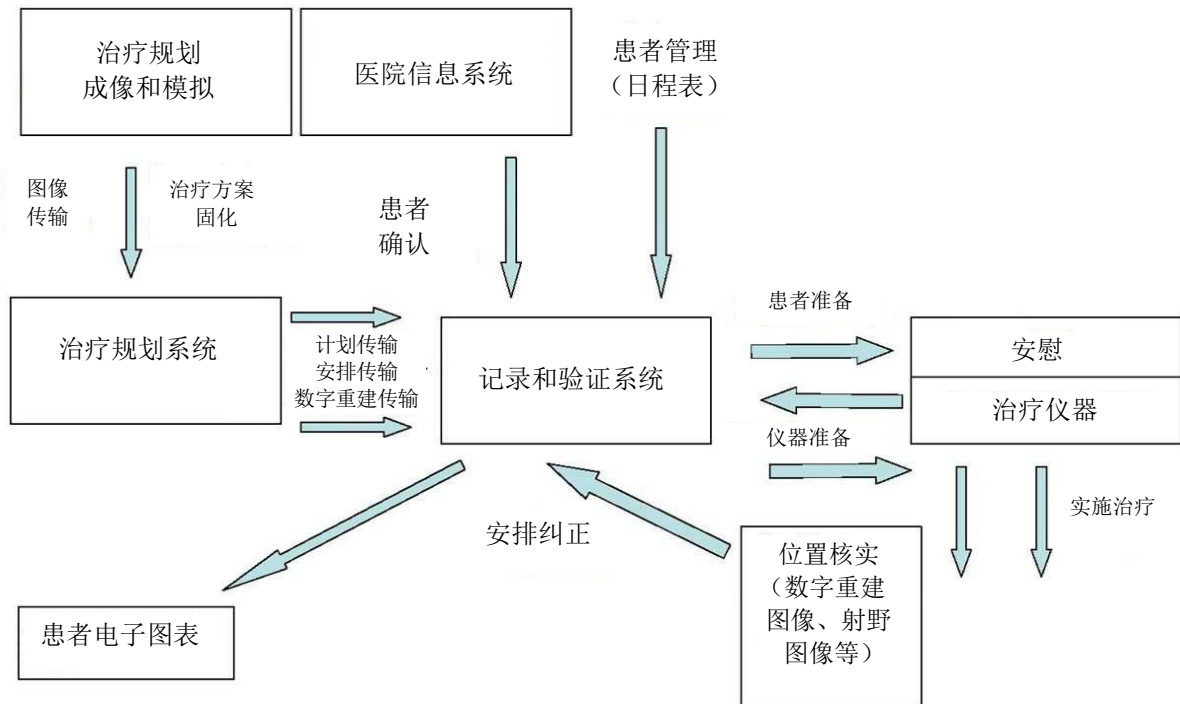


图 E.2. 现代化放射治疗部门的“记录和验证系统”与其他设备部分之间进行典型数据交换的图示。不同的制造商可能提出不同的解决方案建议，从而提供各组成部分或大或小程度的整合。

### E.2.2. 当前在利用放射治疗防治癌症方面的趋势

162. 进行精确的肿瘤定位同时最大程度保护正常组织一直是放射治疗实践的最高目标。20 年来，实现这一目标的能力已大为提高。这一成绩之所以成为可能，是由于成像技术的进步，具体而言，是由于计算机断层照相法、磁共振成像、正电子发射断层照相法和聚变正电子发射断层照相法/计算机断层照相法的发展。<sup>38</sup>

163. 成像技术领域的发展加之计算机技术领域的进步已从根本上改变了肿瘤定向和放射治疗规划过程。由于能够以无限范围的视图显示解剖信息，导致出现了三维适形放射治疗。在这种模式中，所治疗的体积与肿瘤体积的形状密切适形。

<sup>38</sup> B.维克雷姆、C.N.科尔曼、J.A.戴伊：“辐射肿瘤学领域先进技术的现状和未来潜力：挑战和资源”。《肿瘤学》第 23 卷第 3 期（2009 年），第 279 页。

164. **调强放射疗法**将非均匀强度分配给被称为细光束的微小细分光束。由于能够以最优方式控制每一光束内各射线的强度，导致对总辐射通量（如每单位时间穿越特定体积的光子/粒子总量）的控制大为提高。这转而使得能够进行最佳剂量分布的定制设计。改进剂量分布通常导致改善肿瘤控制和减少正常组织中的毒性。<sup>39</sup>

165. **图像引导辐射治疗**可定义为旨在通过治疗前频繁进行靶区和（或）健康组织成像和随后根据这些图像调整治疗来提高放射治疗精度的一种技术。现有几种图像引导方案可供使用：非集成的计算机断层照相扫描、集成的 X 射线（KV）成像、主动植入标记、超声、单层螺旋计算机断层照相、常规计算机断层照相或集成的锥束计算机断层照相。<sup>40</sup>

166. **螺旋断层放射治疗**是一种分层实施辐射的辐射治疗模式。这种实施方法不同于一次辐照整个肿瘤体积的其他形式的外射束辐射治疗。<sup>41</sup> 这种方法的主要优点是总辐照时间相对较短。

167. **体积调制弧疗法**是一种利用直线加速器机架的单次 360 度旋转提供精确造型三维剂量分布的技术。<sup>42</sup> 使这种技术成为可能的是一种治疗规划算法，它在治疗过程中同时改变三个参数：机架的旋转速度、利用多叶准直叶运动的治疗光圈的形状和施用剂量率。

168. **立体定向放射治疗**（虽不涉及外科，但也被称为“放射外科治疗”）包括利用精确立体定向定位技术对小体积施用相对较高剂量的辐射。这种技术的立体定向部分是指利用定型头架系统对患者进行固定，为整个治疗过程确定患者特定的坐标系。<sup>43</sup> 这种模式通常用于颅内肿瘤的治疗。在装好头架后（一般使用穿透头皮并冲击颅骨外板的四根针），实施成像研究（计算机断层照相法、磁共振成像法），对相对于头架坐标的靶区体积进行定位。

169. **机器人放射治疗**是一种无框机器人放射外科治疗系统。机器人放射治疗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。

---

<sup>39</sup> J.M.高尔文、G.伊泽尔、A.埃斯布劳等：“在临床实践中实施调强放射疗法：美国治疗放射学和肿瘤学学会和美国医学物理学家协会共同文件”，《国际辐射肿瘤学生物物理学杂志》第 58 卷第 5 期（2004 年），第 1616 页至第 1634 页。

<sup>40</sup> M.范·赫克：“不同风格的图像引导放射治疗”，《辐射肿瘤学研讨会文集》第 17 卷第 4 期（2007 年），第 258 页至第 267 页。

<sup>41</sup> T.罗克·麦基等：“断层放射治疗；实施动态适形放射治疗的新概念”。《医用物理学》第 20 卷第 6 期（1993 年），第 1709 页至第 1719 页。

<sup>42</sup> K.奥托：“体积调制弧疗法：使用单次机架圆弧的调强放射疗法”。《医用物理学》第 35 卷第 1 期（2008 年），第 310 页。

<sup>43</sup> J.D.布兰德：“立体定向放射外科治疗”，《临床辐射肿瘤学》第二版（L.L.冈德森、J.泰珀编辑），爱思唯尔集团 Churchill Livingstone 出版公司（2007 年），第 6 章，第 151 页。

170. **近距离疗法**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。采用这种治疗方式，可对肿瘤局部施用高辐射剂量，而周围正常组织中的剂量快速下降。过去，近距离疗法大多使用镭源或氡源实施。目前，人工放射性核素如铯-137、铱-192、金-198、碘-125 和钷-103 的使用正在迅速增加。

171. **呼吸门控放射治疗**。辐射肿瘤学家面临着人体治疗部位上的器官和肿瘤在治疗过程中移动的特殊问题。治疗过程中因呼吸或其他原因导致的靶区移动增加了偏离靶区或靶区施用剂量不足的危险。随着辐射剂量的施用量越来越精确，器官和肿瘤的移动成为影响剂量施用准确性的显著因素。这种情况对位于胸部的肿瘤来说尤其显著，因为这些肿瘤随着呼吸移动。移动不仅是胸部肿瘤存在的问题；位于喉部、腹部（肝）、前列腺和膀胱以及整个骨盆上的肿瘤也在实施治疗过程中或前后治疗之间发生移动。

172. **正电子发射断层照相法在放射治疗规划中的利用**。最近几年，正电子发射断层照相法和正电子发射断层照相法/计算机断层照相法成像在肿瘤学领域的利用一直呈增长势头。连同诊断、分期、复发检测和随访，正电子发射断层照相法和正电子发射断层照相法/计算机断层照相法的主要应用之一是评定治疗反应和治疗规划。正电子发射断层照相法除提供解剖成像外，还提供有关肿瘤微环境的分子信息（“功能成像”）。因此，将正电子发射断层照相数据纳入放射治疗规划非常有益。利用功能成像更好地划定治疗靶区是个体化治疗的一个很好例子。实际上，这种方式不使用以前确定的一个或一系列治疗区，而是根据肿瘤确定每个患者的辐射剂量。<sup>44</sup>

173. **粒子治疗：质子束和重离子**。粒子治疗在辐射肿瘤学领域的利用不断增加，并且越来越侧重于质子束的应用。根据粒子治疗合作组的数据，截至 2010 年 3 月，全世界共有 30 个正在运行的质子治疗中心，共计 67 000 多名患者接受了这种方式的治疗。正在运行的质子中心的数量预计不久的将来将翻番。

174. 辐射肿瘤学领域最近的技术发展导致改进了剂量分布和减少了选定肿瘤部位的毒性，这转而可能导致增加肿瘤局部控制机会和提高治愈率。这是这些治疗在辐射肿瘤学家和医院管理人员中受到欢迎的原因之一。但是，与调强放射疗法和其他新技术相关的收入的提高可能导致它们被过度使用。对于大多数肿瘤部位，与肿瘤局部控制和癌症总体存活率有关的临床科学证据目前一般而言还不具有结论性。

175. 原子能机构通过其“治疗癌症行动计划”，并与世卫组织等伙伴合作，继续向成员国提供全面的癌症防治。2011 年，开展了八次“治疗癌症行动计划”综合评定工作组访问，对阿尔及利亚、玻利维亚、哥伦比亚、莱索托、尼日利亚、巴拉圭、菲律宾和乌干达在全面癌症防治各组成部分的国家能力和需求进行了评定。八个“治疗癌症行

---

<sup>44</sup> A. 奇蒂、M. 克里恩科、V. 格雷戈里：“正电子发射断层照相-计算机断层照相数据在放射治疗规划中的临床应用”：我们正在寻找什么？”《辐射肿瘤学》第 96 期（2010 年），第 277 页至第 279 页。

动计划”示范验证点（阿尔巴尼亚、加纳、尼加拉瓜、蒙古、斯里兰卡、坦桑尼亚、越南和也门）除一个外都接受了“治疗癌症行动计划”及其伙伴的后续工作组访问，目的是贯彻落实通过伙伴关系实施全面癌症防治方案的建议。

### E.2.3. 乳腺癌的诊断成像和治疗<sup>45</sup>

176. 虽然发达国家按年龄标准化率表示的乳腺癌发病率几乎是发展中国家的三倍，但这是无关一国社会经济水平的一种最常见的女性癌症。死亡率正在增加，特别是在世界上没有早期检测计划的地区尤其如此。年龄、家族史和遗传、第一次怀孕很晚和肥胖症是已确定的患乳腺癌风险的因素。成像在乳腺癌筛查以及分类和确定乳房肿瘤大小方面起着关键性作用。

177. 大多数乳腺癌通过作为国家普查计划一部分的乳房 X 线照相进行检测。在评价可疑/不明确的乳房肿块方面，超声检查被例行地用作体检和乳房 X 线照相的一个基本补充。超声还成为从核心针刺活检到切除的定向经皮乳房肿块介入程序的一种选择模式。注射对比剂的磁共振成像在确定乳房 X 线照相上不明确的乳房肿块是恶性还是良性以及在确定恶性疾病局部程度方面起着主要的作用。

178. 除了辐射成像（乳房 X 线照相、超声、磁共振成像）外，核医学成像技术也正在乳房损伤的诊断表征方面起着不断增加的补充作用，特别是在利用乳房成像专用装置进行常规闪烁乳房 X 射线照相和最主要的正电子发射断层照相法时尤其如此。放射性核素程序作为放射性引导隐匿性病灶定位或是在初步治疗阶段作为放射性引导前哨淋巴结活检，对于乳腺癌患者放射性导引手术均至关重要。全身正电子发射断层照相法对于全身分期、局部晚期乳腺癌新佐剂治疗后的重新分期和评定抗肿瘤治疗的效用也非常重要。

179. 乳腺癌的治疗通常将外科手术、放射治疗、化学疗法和激素疗法结合起来进行。治疗选择以临床和病理的预后因素为基础，这包括就诊时的疾病阶段、肿瘤的组织学分类和分化程度、年龄和绝经状态、雌激素和（或）孕激素受体的有无以及人表皮生长因子 2 型受体的过度表达。

180. 对于早期乳腺癌，术后放射治疗可改善肿瘤的局部控制和提高成活率。另一方面，乳腺癌存活着患上长期并发症的概率也较高。通常在接受治疗 10 年或更长一段时间后出现心脏毒性表现，如冠心病、心包炎、心肌病、瓣膜病、传导异常等。在过去 10 年中，放射治疗技术的进步促进减少了乳腺癌治疗的毒性。三维适形放射治疗的使用使得能够对肿瘤体积施用必要的辐射剂量，这些剂量与肿瘤体积密切适形。与此同时，正常器官（如心脏、肺）可不受损害。

181. 调强放射疗法是一种精密类型的三维适形放射治疗，它将非均匀强度分配给被称

---

<sup>45</sup> 可从大会 GovAtom/GC 网站《2012 年核技术评论》的相关附文中获得更多资料。

为细光束的微小细分光束。由于能够以最优方式控制每一光束内各射线的强度（也称“剂量绘画”），使得可以实现有益的剂量分布：肿瘤接受的剂量高而正常器官（心脏、肺、皮肤等）接受的剂量低。

182. 在乳腺癌放射治疗中成功应用的另一项高精度先进放射治疗技术解决了正常呼吸造成的靶区移动问题。这项技术考虑到了四维，即时间运动，因此，它也可称为“四维适形放射疗法”。这种由计算机驱动的呼吸门控放射治疗使得能够分析胸部运动并触发与呼吸循环同步的治疗束。可选择一个特定的呼吸阶段（吸气或呼气）进行辐照。因此，靶区始终被辐射束所覆盖，同时避免了安全裕度减少所致对关键器官的过度照射。<sup>46</sup>

183. 对于加速部分乳腺辐照而言，在整个局部术后过程在五天或更短时间内完成并以每部分高剂量对瘤床实施治疗的情况下，可结合外射束放射治疗使用高剂量率近距离疗法。近距离疗法是通过将放射源放置在肿瘤/瘤床或体腔附近或置入肿瘤/瘤床或体腔中来实施辐射治疗。采用这种治疗方式，可对肿瘤局部施用高辐射剂量，而周围正常组织中的剂量快速下降。对于乳腺癌，可实施间质性多导管近距离疗法或使用充气气球的腔内近距离疗法。

184. 局部晚期乳腺癌（乳房内大于 5 厘米或侵入皮肤或胸壁的晚期肿瘤，或乳房中已转移到局部结节的任何大小的肿瘤）的治疗仍是一个重大挑战。<sup>47、48</sup> 对于可手术疾病（在肿瘤和结节没有固定和未发生深远转移时，如未转移到骨头、脑部、肺部等），治疗包括将外科手术、化学疗法和（或）激素疗法及辐射治疗相结合。每种方式的益处已在大型随机试验中进行了验证<sup>49、50、51、52</sup>。即使实施辅助化学疗法，在适当外科手术

---

<sup>46</sup> S.M.吉卡斯、E.约克：“辐射治疗中减少器官移动的深吸后屏气和呼吸门控策略”，《辐射肿瘤学研讨会文集》第 14 卷第 1 期（2004 年），第 65 页至第 75 页。

<sup>47</sup> S.E.辛格尔特里、C.奥尔雷德、P.阿什利等：“美国联合癌症委员会乳腺癌分期系统的修正”。《临床肿瘤学杂志》，2002 年；20 (17): 3628-3636。

<sup>48</sup> F.L.格林、D.L.佩奇、I.D.弗莱明等编辑，美国联合癌症委员会《癌症分期手册》第六版，2002 年；纽约州纽约市，施普林格出版社。

<sup>49</sup> A.G.塔吉恩、J.H.郑、E.P.马穆纳斯等：“实施乳房切除术治疗、接受或不接受全身辅助治疗且不接受放射治疗、其肿瘤 5 厘米或更大的淋巴结阴性乳腺癌患者的局部复发率较低：五个国家外科辅助乳腺和肠项目随机临床试验的结果”。《临床肿瘤学杂志》，2006 年；24 (24): 3927-3932。

<sup>50</sup> A.G.塔吉恩、J.H.郑、E.P.马穆纳斯等：“实施乳房切除术和辅助化学疗法治疗、使用或不使用它莫西芬且不接受放射治疗的患有可手术乳腺癌患者的局部失败模式：五个国家外科辅助乳腺和肠道项目随机临床试验的结果”。《临床肿瘤学杂志》，2004 年；22 (21): 4247-4254。

<sup>51</sup> H.M.尼尔森、M.奥弗高、C.格罗、A.R.让松、J.奥弗高：“乳房切除术后除接受全身辅助治疗外还接受或不接受放射治疗的高风险乳腺癌患者的失败模式研究：丹麦乳腺癌合作组 82 b 和 82 c 随机研究的长期结果”。《临床肿瘤学杂志》，2006 年；24 (15): 2268-2275。

<sup>52</sup> A.雷希特、R.格雷、N.E.戴维森等：“在实施乳房切除术和辅助化学疗法、使用或不使用它莫西芬且不接受辐照 10 年后的局部失败：东部肿瘤协作组的经验”。《临床肿瘤学杂志》，1999 年；17 (6): 1689-1700。



后仍存在着相当大的局部复发风险。局部失败的风险因素包括年龄、肿瘤大小、绝经前状态、阳性淋巴结数量和全身治疗使用情况。局部复发的发生时间据报告为 3—12 个月后<sup>53</sup>，但大多数局部复发发生在三年以内。

185. 原子能机构正在协调研究项目（项目 E33025）下开展对实施了乳房切除术和需要术后放射治疗的乳腺癌患者的研究。该临床试验对两种不同的放射治疗野设置进行比较，以调查是否能够避免对锁骨上区的辐照。由于原子能机构的临床研究目的是以资源节省战略的可能优势为基础，该研究中使用的分次将放射治疗的总期限缩短到三周，而常规分次为五周。这种做法将使等候名单很长、工作繁忙的放射治疗部门能够采用治疗更短或更简单的循证协议。

## F. 环境

### F.1. 快速放射分析方法可在评定紧急情况中的放射性污染方面有所作为

186. 福岛事故表明，可能需要在非常短的时间内对大量环境样品作出分析，从而大大加剧分析实验室人力、物力和后勤资源的紧张。正如日本当局定期报告的大量有效“实时”数据所显示的那样，在这种情况下加快分析处理时间和优化分析策略至关重要，以便遵守量化监管限值和公认的质量标准。

187. 无论是核应急、各种核设施的意外释放还是涉及放射性攻击的恶意行为，迅速将对环境释放和污染的评定意见提供给有关当局，可对处于危险中的个人和民众的安全造成显著影响。在发生导致潜在环境释放的事件后，立即通过剂量率测量和快速筛检方法如气溶胶和气体放射性监测以及辐射绘图进行辐射监测，都是建议使用的常见方法。在许多类型的意外情况中，都可通过利用涉及沉积的就地筛检、使用移动装置绘制土壤污染区域图以及空中和水中  $\gamma$  测量的现场  $\gamma$  射线能谱测量技术，快速评价环境放射性污染。这样，就可在相对较短的时间内对广大地区进行筛检、确定污染的程度和范围以及使取样战略达到最优化。

188. 在放射性事件的后期阶段，应当根据经验证的方案对所收集的样品进行更准确和精确的分析，以便更准确地评定辐射照射。全面的剂量重建要求自释放的初期就开始分析所有的放射性核素，包括气体、颗粒和液体形态的放射性核素。 $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  的总量和能谱测量通常在批量样品或经过放化处理的样品上进行。福岛事故突出表明了建立能够应对可能剧增的工作负荷的分析实验室的重要性。快速方法使得能够将分析所需的时间从数日或数周减至数小时或数日。最为重要的是，对于放射性核素，有必要验

---

<sup>53</sup> A.阿德尼皮昆、O.B.坎贝尔、A.R.奥耶斯贡、T.N.埃隆米卢：“伊巴丹早期乳腺癌的放射治疗：在临床无淋巴结转移的腋窝仅进行胸壁辐照的结果”。《非洲医学和医学科学杂志》，2002 年；31(4): 345 - 7。

证和实施这类方法，因为放射性核素会给所有潜在受影响环境介质以及非常重要的食品和动物饲料带来很大的放射性关切。

189. 使用经过良好表征和验证的取样和分析程序对涉及若干实验室或实验室网络并且测量可比性是一主要问题的跨境环境评定来说特别重要。原子能机构通过举办培训、开展协调研究项目、提供广泛污染物的基准材料、协作发展和实施分析技术以及组织水平测试和实验室间比对来支持成员国的实验室和实验室网络。由原子能机构协调的 ALMERA 网络是一个全球性的测量环境放射性的分析实验室网络，它由成员国指定的实验室组成，能够在发生放射意外或有意释放事件时提供可靠和及时的环境样品分析。

190. 该网络从事对快速方法的协作验证，并将进一步将努力重点放在放射性核素和与应急紧密相关的样品上。2011 年为该网络组织的水平测试侧重于水土样品中的  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  发射体。规定快速报告  $\gamma$  辐射放射性核素的期限为收到样品后短短的三天，以测试实验室在时间限制下的分析实绩。今后，原子能机构和 ALMERA 网络实验室将开发更多的基准材料和报告期限很短的水平测试，以便全面涵盖紧急情况提出的所有要求。在 2012 年，将侧重关注气溶胶样品的质量和可比性。

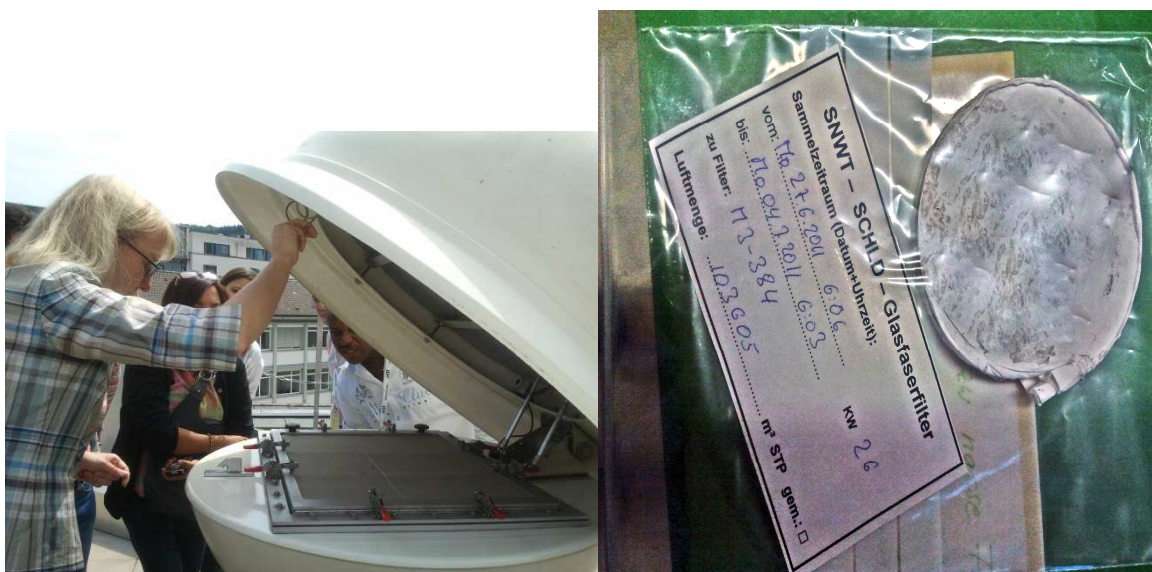


图 F.1. 德国萨尔茨吉特联邦辐射防护办公室运行的大容量气溶胶收集器，以及在卡尔斯鲁厄技术研究所 2011 年主办的原子能机构“海洋放射性：分析技术和质量管理跨地区高级培训班”上向学员展示的用于即时  $\gamma$  能谱计数的袖珍型气溶胶过滤器。

191. 福岛事故还表明，将分析负担分散到良好协调网络范围内的各个实验室和部署移动实验室是有用的补充解决方案，但这需要事先规划。对支持及时决策同等重要的是快速而可靠的数据验证和报告机制。现代移动通讯技术将为数据可追溯性和质量提供支持的计算机化关系数据库、地理信息系统、多媒体文件编制、在线程序访问和作业援助的联合优势带到了现场。将遥感纳入水文气象观测和模拟对于为调整监测战略以及为当局制订对策提供快速指导至关重要。与更常用的空中和地面原地  $\gamma$  能谱测量相比，一个显然需要进行技术发展的领域是通过对沿海环境进行固定式和移动式高分辨

率  $\gamma$  能谱测量实施原地地下水监测，这将有助于重建液态放射性释放和快速检查水污染和沉积物污染。

## G. 水资源

192. 世界范围内农业、能源、工业和城市的用水需求继续增长。连同对预期气候变化对水文循环的影响的日益关切，不断增长的水需求正在给水资源的分配和管理带来重大变化。在一些地区，正如“2011年世界水日”报告<sup>54</sup>中强调的那样，由于在提供安全饮用水供应方面的困难，这种状况已升级为冲突。该报告从城市发展的角度探讨了水供应问题。由于大部分地表水已经分配和（或）正在受到污染，预计地下水将在不久的将来发挥更大的作用，为全世界提供很大部分的淡水。遗憾的是，大多数国家都对它们的地下水资源缺乏确保适当的水供应所需的了解。

193. 为了采取将促进共享有限资源的适当政策，需要获得有关现有水资源可利用性和状况的可靠和全面的资料。同位素方法能提供可用于快速有效地评定地下水资源和绘制地下水区域图的独特资料。同位素技术和相关地质化学工具加之通过利用地理信息系统和地质统计方法在绘图方面取得的近期发展有助于水专家和水事管理人员更好地进行含水层和地下水水体几何形状、体积和特性的划定、量化和可视化。标明了气候变化适应性较强的水体或有效补给区的地图对确保长期获得水供应至关重要。

### G.1. 在获取稳定同位素数据方面的趋势

194. 2011年，使用基于激光光谱测定的低成本和易于操作设备分析水中的稳定同位素（氧-18和氘）成为全世界研究团体的标准程序。由于这一创新，发达国家和发展中国家的许多小组已经能够自主地进行水文学研究所需的稳定同位素分析，从而避免了从著名实验室获得分析结果所造成的延误，并因成本降低而受益。例如，由于拥有了这种分析仪，正在以更高效的方式进行以评定厄瓜多尔圣埃伦娜半岛地下水资源为目的的研究（见图G.1.）。下一年期间，预计基于同一技术的碳-13和氮-15分析仪的开发将加速，从而促进这些同位素在地下水和地表水研究中的利用。

---

<sup>54</sup> 见：[http://www.unwater.org/downloads/World\\_Water\\_Day\\_2011\\_Final\\_Report\\_Web.pdf](http://www.unwater.org/downloads/World_Water_Day_2011_Final_Report_Web.pdf)。



图 G.1. 厄瓜多尔沿海社区对地下水资源的获取得到改善，是主要因稳定同位素分析仪提供的数据增加了科学认识的结果之一（图片由厄瓜多尔瓜亚基尔 ESPOL 提供）。

## G.2. 地下水测龄

195. 相对于稳定同位素分析设备，许多发展中国家缺少测量地下水测龄中常用的低活度放射性核素所需的分析设备，这种设备对评定地下水的可持续性、易受污染性和补充速率非常重要。一直普遍利用环境放射性核素如氚或碳-14 来获得这种知识。最近几年，在分析方面的一些发展已改进了这些同位素分析（例如，利用氦内向生长法和质谱测定进行氚分析），但设施数量仍然有限。同样，对最近获得补给的地下水测龄所用的氚/氦-3 方法在目前的应用增多，但对能够为这种技术提供支持的分析设施的利用也受到限制。

196. 利用惰性气体同位素对若干年龄范围内的地下水进行测龄的做法在过去几年中显著增加，并且还在继续增加，在该领域的研究也是这样。例如，美国阿贡国家实验室和德国海德堡大学等研究机构正在开发原子俘获示踪分析技术，这种技术为利用惰性气体同位素进行地下水测龄开辟了新的可能性。目前正在对最近补给的地下水（达到 100 年）使用氦-85。对于 2000 年以上的地下水补给，还成功地应用了氦-39。对于沉积盆地中的大型含水层，如非洲北部的努比亚沙岩含水层系统和南美洲的瓜拉尼含水层系统（这些深部含水层中的地下水年龄可高达 100 万年），正在越来越多地利用长寿命放射性核素如氪-81<sup>55</sup>，从而改进了地下水流动和迁移模型。同位素水文学提供了获得有关可用水数量以及水质和预期演变的所需资料的可能性。原子能机构继续在审查和评定这些新工具和方法学以及在向感兴趣的成员国提供对它们的利用和知识转让方面发挥着关键作用。

---

<sup>55</sup> 见：<http://www.nytimes.com/2011/11/22/science/rare-krypton-81-isotope-helps-track-water-in-ancient-nubian-aquifer.html?src=dayp>。

## H. 放射性同位素生产和辐射技术

### H.1. 放射性同位素和放射性药物

#### H.1.1. 用发生器生产的正电子发射断层照相用放射性核素的近期发展

197. 核成像领域的进展始终与具有新型物理和化学特性的新放射性核素的生产密切相关。用发生器生产的正电子发射断层照相用放射性核素正在变得越来越易于获取，因为它们能够在没有现场回旋加速器的医院中生产。目前，镓-68 可通过锗-68/镓-68 商用发生器获得，并广泛用于正电子发射断层照相法成像。这是一个重要的技术发展，因为与镓-177 和钇-90（越来越多地用于治疗某些癌症的两种放射性核素）化学性质相似的镓-68 可利用既定化学路线通过 DOTA 桥接附加到奥曲肽等生物活性肽上，用于在实施治疗前通过诊断扫描准确标出神经内分泌肿瘤。在镓-68 DOTATATE 取得成功的基础上，许多研究人员正在积极探索利用新型镓-68 标记肽进行其他类型肿瘤成像的可能性。一个例子是铃蟾肽，这是已知在乳腺肿瘤、前列腺肿瘤和肺肿瘤中有受体的一种肽。铃蟾肽一直用镓-68 标记，目前正在对其在这类肿瘤成像中的用处进行评价。除了锗-68/镓-68 发生器系统外，各研究中心正在生产其他可能引起兴趣的正电子发射装置用发生器系统，包括例如钛-44/钪-44 发生器系统、硒-72/砷-72 发生器系统和钷-140/镱-140 发生器系统。

#### H.1.2. 正电子发射断层照相法示踪剂用基于微流体的合成系统的发展

198. 用氟-18 作为免疫正电子发射断层照相法示踪剂标记生物分子的方法要求对放射性标记条件进行广泛优化。这种过程往往用掉大量的稀缺生物分子。微流体系统利用含活性成份的少量流体进行正电子发射断层照相法放射性药物的合成。微流体系统有许多优点，例如，甚高的表面体积比所导致的更高效化学反应以及快速而精确的温度控制。其他的好处是由于过程的自动化以及微流体关键部件成本低、可互换、可用后废弃并具有质量保证，能够在高可控条件下以可复制方式灵活和可靠地生产放射性药物。由于微流体系统规模小，满足对该系统的辐射防护要求所需的费用明显较低。这种系统还为实验室提供了更好的空间利用。在考虑使用稀缺而昂贵的生物分子进行正电子发射断层照相法放射性标记时，微流体系统尤其有效。

199. 最近开发的数字微流体液滴生成芯片能够按规定比率提供由计算机控制的氟-18 标记、生物分子和缓冲液的计量和混合。这切实使得能够快速优化纳升体积的反应条件，然后能够将其转换为对癌症特异性工程抗体片断的实验室规模氟-18 标记。这些技术于 2011 年推出，将对新型正电子发射断层照相法示踪剂特别是仅提供小数量基本生物分子的免疫正电子发射断层照相法示踪剂的临床前研究和临床应用产生很大影响。世界各地的一些制造商目前正在开发采用基于微流体的放化合成技术的新型氟-18 标记方法。

### H.1.3. 用于同位素生产的多粒子回旋加速器

200. 在 2011 年能够观察到的一个趋势是许多制造商对其回旋加速器系统进行了升级，以便提高束流和能量，满足当前对单光子发射计算机断层照相、正电子发射断层照相和治疗应用中使用的放射性核素的需求。能够以高强调加速质子、氘核、氦-3 和  $\alpha$  粒子的新型通用多粒子同位素生产回旋加速器的开发是回旋加速器技术的一个新趋势，这使得使用束流而不是正电子生产合理数量的放射性核素具备了可行性。可使用  $\alpha$  束生产新的治疗用同位素如  $\alpha$  发射体碲-211 和  $\beta$  发射体铜-67。虽然理论上能够通过若干核路线生产各种放射性核素，但低浓铀靶件同位素上的 (p, n) 反应最为有效。多粒子回旋加速器的出现将扩大放射性核素的范围，并为提供目前供应有限的有关放射性核素开辟新的路线。例如，能够通过低能 (p, n)、(p,  $\alpha$ ) 或 (d, n) 反应生产具有已证明用途的铜-66、碘-124 和钇-86，以及新兴放射性核素如钴-55、溴-76、镉-89、铷-82m、锝-94m、碘-120 等。使用中能质子或氘核生产铁-52、硒-73 和铯 83 等放射性核素需要在后续化学处理方面加以特别考虑。

## H.2. 辐射技术应用

### H.2.1. 经 $\gamma$ 辐照的疫苗显示在抗击疟疾方面具有潜力

201. 疟疾是一种影响着全世界数百万人的潜在致命性寄生虫病。虽然以基于致弱活病毒的疫苗为基础的疫苗接种程序能够成功地防止一些传染性疾病包括脊髓灰质炎、黄热病、麻疹和天花，但开发防止恶性疟原虫这一最致命性疟疾寄生虫的有效疫苗继续是现代医学的重大挑战之一。

202. 在最近于 2011 年 6 月在加拿大蒙特利尔举行的辐射加工国际会议上，来自 Sanaria 公司、国家标准和技术研究所和 Protein Potential 公司的研究人员报告开发了一种基于辐射致弱孢子的高效疫苗，它能够防止疟疾的血液阶段感染，从而保护人们免于这种疾病以及阻止这种疾病的传播。所报告的疫苗由通过  $\gamma$  辐照产生的代谢活跃但不复制的致弱恶性疟原虫孢子组成。已经解决了为初步临床试验生产符合监管标准的充足数量疫苗的挑战，并成功实现了重要目标，如确定能够减弱所有寄生虫而又不降低效力的辐照剂量，以及充分遵照美国食品和药品管理局规定的当前的所有良好生产实践制订辐照方法和建立监测系统。涉及 80 名志愿者的恶性疟原虫孢子疫苗的第一阶段试验已经完成，验证了该疫苗的效力。该疫苗现处于临床试验的后期阶段，可能取代并发症发病率相对较高的现有疫苗。

### H.2.2. 辐射接枝薄膜有助于清洁福岛地区的污染水

203. 2011 年 3 月日本严重地震引发的海啸破坏了福岛第一核电站核反应堆的电力供应并导致冷却水循环停止。由于核反应堆的熔化，放射性物质弥散到周围地区包括许多水体中。

204. 为了选择性地去除这类污染水中的放射性铯，对日本原子力研究开发机构量子束

科学部通过将适当单体以辐射方式接枝到聚乙烯非织造布上开发的纤维高分子吸附材料进行了试验。使用折放在一个套筒中的接枝吸附材料对饭馆村一个池塘和福岛市一所学校游泳池中的放射性铯进行了去除。这两个试验都成功完成。这种技术的另一个优点不仅是能够去除放射性铯，还因为直接收集有毒成份，不产生任何污泥，因而无需进行额外的处理和净化。



图 H.1. 正在使用接枝膜清除福岛地区水体中的放射性铯  
(图片由日本高崎日本原子力开发机构提供)。

### H.2.3. 用农工废渣生产生物乙醇的电子束技术

205. 根据国际能源机构最近发表的《技术路线图：生物燃料用于运输》，到 2050 年，生物燃料可能占全部运输燃料的 27%，而目前仅占 2%。<sup>56</sup> 这可显著减少二氧化碳排放，同时加强能源安全，如果使用农工副产品，还不损害粮食安全。传统或第一代生物燃料是用粮食如玉米和甘蔗生产的，而先进或第二代生物燃料是用农工废渣如稻草、玉米芯和甘蔗渣生产的。生物燃料的一个例子是生物乙醇，它具有与汽油相似的

---

<sup>56</sup> 见：[http://www.iea.org/papers/2011/biofuels\\_roadmap.pdf](http://www.iea.org/papers/2011/biofuels_roadmap.pdf)。

特性，但无磷和易于降解，可为农户提供除粮食生产之外的替代收入来源。第二代生物燃料如生物乙醇的另一个益处是与汽油相比可减少温室气体排放。研究已经显示，如果土地利用不发生显著变化，基于甘蔗的乙醇可将温室气体减少 86%至 90%。

206. 先进生物燃料的生产仍处于开发阶段，因为还需要进一步提高转换效率和降低成本。就使用纤维素来源生产生物乙醇而言，挑战之一是纤维素的酶解缓慢且费用很高。

207. 据向 2011 年 6 月的辐射加工国际会议提交的报告，将热水解（40 分钟，180°C）与对甘蔗渣的电子束辐照（50 千戈瑞）相结合导致减少了纤维素和半纤维素的部分分解所形成的低聚糖数量。巴西、日本、大韩民国和美国的研究小组以前的工作成果显示，用 30 千戈瑞对甘蔗渣进行电子束辐照可将纤维素的酶解提高 75%，并增加生物乙醇的产量。



图 H.2. 巴西的甘蔗收获（图片由巴西圣保罗核能和能源研究所提供）。

### H.3. 辐射技术在采矿中的应用<sup>57</sup>

208. 放射性示踪剂和核子测量仪表正在越来越多地用于采矿，主要是用于自然资源的勘探和有效开发。较易探测的放射性示踪剂用于过程工业中的非侵入性研究，而核子测量仪表则用于资源勘探。中子和  $\gamma$  射线的深层穿透使得核技术适宜于钻孔测井应用，因此，这些技术已在石油、天然气和铀工业广泛应用了很长时间。这些技术现在也已开始用于煤炭开采和矿物开采工业。

209. 此外，各种核能谱测定法在现场和工业环境中被成功用于样品的现场分析。现代便携式核能谱仪可节省大量的时间和人力，同时又不损害比得上常规实验室仪器的性能。

210. 采矿业、冶金业和矿物加工业是这些技术和工艺的主要受益行业。由于所带来的诱人益处，放射性示踪剂和核子测量仪表在这些行业中的应用正在扩大和继续发展。正在开发新型示踪剂、用户友好软件、新型探测仪和数据获取系统并将它们用于实践。

---

<sup>57</sup> 可从大会 GovAtom/GC 网站《2012 年核技术评论》的相关附文中获得更多资料。