

**第五十九届常会**

临时议程项目 17  
(GC(59)/1)

## 2015 年核技术评论

### 总干事的报告

#### 概 要

- 为响应成员国的要求，秘书处每年编写一份综合性“核技术评论”。今年的报告随附于后，其中突出强调了 2014 年令人瞩目的发展情况。
- 《2015 年核技术评论》涵盖以下选定领域：动力应用、原子数据和核数据、加速器和研究堆的应用、核技术用于改善牲畜健康、医用辐射剂量学、放射性药物、同位素用于气候和水文学研究以及利用核技术了解海洋环境的变化。
- 最后文本将根据理事会的讨论结果编写，并将作为大会第五十九届常会期间的资料性文件提供给成员国。
- 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《2014 年年度报告》(GC(59)/7 号文件)，特别是其中的技术部分，还可参阅《2014 年技术合作报告》(GC(59)/INF/3 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。



# 2015 年核技术评论

## 总干事的报告

### 执行摘要

1. 随着 2014 年底在运反应堆达到 438 座，核能已经拥有了 376.2 吉瓦（电）的全球发电容量。只有一座反应堆永久关闭。有五座新并入电网，并有三座新反应堆开工建设。近期和长期增长预测仍集中在亚洲，特别是中国。在建的 70 座反应堆中，有 46 座在亚洲，自 2004 年以来最新并网的 40 座反应堆中，也有 32 座在亚洲。
2. 目前有 30 个国家正在使用核电，并且有大约同样数量的国家正在考虑、规划或积极努力将核电作为能源结构的一部分纳入。在正在运行核电厂的 30 个国家中，13 个正在建设新厂或积极完成以前暂停的建造项目，12 个正计划建造新厂或完成暂停的建造项目。已经决定引进核电的几个国家正处于基础结构后期准备阶段。
3. 原子能机构 2014 年的预测表明，到 2030 年，核电装机容量将增长 8%至 88%。发展中世界人口和电力需求的增长、对核电在减少温室气体排放方面作用的认识、能源供应安全的重要性以及化石燃料价格的变化无常均表明，核能长期而言将在能源结构中发挥重要的作用。
4. 继续在世界各地的核电厂进行安全改进。这些改进包括确定和适用从福岛第一核电站事故汲取的教训、提高纵深防御的有效性、加强应急准备和响应能力、加强能力建设以及保护人类和环境免于电离辐射。
5. 虽有报告指出在勘探和开发上投入了大量开支，但许多新的开采项目因铀价低而被推迟或预计将被推迟。非常规铀资源进一步扩大了资源基础，对从海洋中经济地回收铀的研究也取得了令人鼓舞的结果。
6. 全球浓缩能力仍高于年总需求量，同时，其他燃料循环活动的运作则保持在相对稳定的水平。为了促进供应保证框架，就建立哈萨克斯坦原子能机构低浓铀银行的财政、法律和技术安排开展了大量工作。
7. 就实际情况而言，所有成员国都不得不管理某种形态的放射性废物。在原子能机构大会第五十八届常会期间举办的“科学论坛”强调了制订全面、综合、“从摇篮到坟墓”的放射性废物管理方案的必要性，并突出强调了存在可供执行的解决方案的事实。

8. 由于许多成员国延迟对乏燃料管理作出政策决定，全球贮存中乏燃料的数量继续增加。2014 年，从全部核电厂作为乏燃料卸出的重金属约有 1 万吨，从而使累积数量达到约 38.05 万吨重金属，其中约有 25.87 万吨重金属贮存在反应堆设施或离堆设施中。

9. 自世纪之交以来获得的重要退役经验将有助于处理预计今后数年中在此领域进行的大量工作。全世界有 149 座核动力堆已永久关闭或正在进行退役，其中包括 17 座已完全退役的反应堆。在全部在运反应堆中，略高于半数的反应堆已有 30 多年堆龄，其中约有 14% 已超过 40 年堆龄。虽然一些反应堆可以继续运行多达 60 年，但许多将在今后 20 年内退役。此外，480 多座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退役。

10. 与之相类似，一些国家已建立起治理受以往实践和事故影响土地方面的适当技术资源和专门知识，但许多国家计划仍面临着显著挑战，这些挑战阻碍着治理计划的实施。日本已在治理受福岛第一核电站事故影响的土地方面取得显著进展，并在治理活动与重建和振兴努力之间进行了良好协调。与国际社会共享从治理工作中汲取的经验教训至关重要。

11. 国际核数据界已着手进行通过经济合作与发展组织核能机构（经合组织核能机构）的国际合作编评数据库组织的项目将作为全部核技术之支柱的“编评核数据文件”加以统一的工作。这将产生可供所有评价项目用于所有应用的关于最高优先等级的核即氢、氧、铁和主要钢系元素的单一文件。

12. 2014 年，启动了两个都在欧洲的大型加速器项目。原子能机构在意大利的里雅斯特 Elettra 设施作为 X 射线荧光束线终端站新建的多技术试验设施将使来自成员国特别是发展中成员国的研究小组能够利用最先进的同步加速器设施。

13. 在运的 247 座研究堆和临界装置大多仍存在利用率严重不足的问题，并且平均已运行 45 年以上。六个国家正在建造新研究堆，而若干其他国家正在计划或考虑建造新研究堆。建立因特网反应堆实验室和原子能机构指定的研究堆国际中心等倡议的目的是加强教育和培训领域的国际合作及这类设施的高效利用。

14. 虽然 2014 年期间没有出现重大的医用同位素钼-99 供应短缺，但加工设施和老旧研究堆的运行挑战依然如故。

15. 继续开展了最大程度减少高浓铀在民用核部门的使用的全球活动，在美国的“减少全球威胁倡议”实施范围内的 200 座研究堆中，有 92 座现已被转换为低浓铀燃料或已确认关闭。到 2014 年底，美国和俄罗斯产高浓铀燃料返还计划分别已完成了 76% 和 86%。

16. 原子能机构在维也纳附近塞伯斯多夫的核应用实验室自 1962 年以来一直协助成员国加强对核技术的和平利用。这种支助多数是通过原子能机构技术合作计划提供的，直接响应成员国在粮食和农业、人体健康、陆地环境和核仪器仪表等领域的需求。原子能机构的新倡议“核应用实验室的改造”项目是这些实验室自建立以来的首次全面

改造，目的是将它们升级为符合用途的实验室，以帮助成员国应对今后 20 年中的全球发展挑战。

17. 核和核相关技术正在动物健康领域特别是疾病诊断和病原微生物表征方面发挥重要作用。

18. 疫苗是保护动物和人类免于疾病的重要工具。疫苗辐照方面的最新发展使得能够培育具有代谢活性而不具有复制性并从而引起与暴露于活病原体相似的免疫系统反应的疫苗。

19. 早期、快速诊断对控制跨境疾病传播至关重要。虽然酶和荧光染料对诊断有效并对实地使用具有实用性，但在需要高水平灵敏度和特异性的情况中（例如，诊断 H5N1 禽流感、口蹄疫、裂谷热或非洲猪瘟）却需要核技术。

20. 随着核酸放大平台技术（如聚合酶链反应）的出现，传染性疾病的诊断实现了显著改进。这些技术的主要优势是能够检测到动物体内极低水平的感染，从而使得能够在发病前就检测到病原体。病原体的早期检测对预防疾病爆发如 2014 年西非最严重的埃博拉病毒病爆发至关重要。原子能机构通过帮助非洲成员国发展或加强应用快速和准确诊断和控制技术方面的国家和地区能力与网络对国际努力作出了补充。作为这种技术平台之一的逆转录-聚合酶链反应被公认是对埃博拉病毒进行快速而高效的诊断技术。

21. 可以利用稳定同位素分析技术为认识动物传播疾病流行病学提供工具。利用稳定同位素表征一个种群涉及检查对整个种群具有代表性的一些个体的同位素特征。特定种群的同位素特征一旦已知，该种群的任何个体均可提供关于该种群全球迁徙情况的信息。

22. 有效地监测患者在辐射治疗和诊断过程中所受辐射照射的剂量对核实治疗系按处方实施或估计与在医学成像程序过程中受到辐射照射的患者有关的风险都非常重要。

23. 诊断用 X 射线成像被用于从简单的投影放射照相到先进的截面动态成像的广泛检查类型。这导致开发了广泛的剂量学量值、测量仪器和技术，它们都给在临床环境中工作的人员提出了挑战。

24. 放射治疗过程的一项关键要求是应当具有一致的参考剂量学标准和程序。目前正在制订新的标准和导则，以便与放射治疗技术的发展保持同步。

25. 使用小射野的放射治疗技术最近出现增长，这增加了临床剂量的不确定性，并使适用为较大射野制订的现有参考剂量学协议的适当性受到了怀疑。目前正在制订对小射野剂量学进行标准化的剂量学实施法规。

26. 经校准的井式电离室是近距离疗法中使用的进行放射源校准的首选剂量计。但对于近距离疗法中使用的所有放射源以及对于相关建议使用的剂量学仪器仪表，却没有国际

统一的质量保证/质量控制准则。正在为制订水吸收剂量标准作出努力，以便与外射束放射治疗的剂量学实施法规实现统一。

27. 已在放射性同位素生产技术的发展方面取得显著进展，使得能够更广泛地获得包括镓-68，铜-64，铅-89 和锌-63 在内的若干新放射性核素，并促进了基于加速器的钨-99m 商业生产技术的发展，钨-99m 仍是最广泛使用的诊断用放射性核素。供医学应用的新放射性同位素的可获得性也许能解决尚未预见的临床问题。这些进步正在给核医学领域带来巨大变化。

28. 确保获得安全饮用水以及有充足的淡水供应用于卫生、粮食生产和能源生产是许多国家的一项持续挑战。新同位素工具和方案加上创新性分析技术的发展，在最近几年中促进了利用环境同位素了解、监测和评定气候变化对水和其他自然资源影响的做法的显著扩大。

29. 全面、基于科学的水资源评定对可持续发展至关重要。更简单、更便宜且维护率低的基于激光的仪器正在促进基于稳定同位素的应用的扩大。对需要更先进分析方法来测量惰性气体和长寿命放射性核素的地下水测龄所需的更新型同位素工具的需求预计在不远的将来将持续存在。

30. 大气二氧化碳的增加正在越来越大地影响着海洋环境。放射性核素为了解不断变化的碳循环以及不断变化的碳循环如何影响生物提供了强有力的工具。放射性核素还可用于重建海水化学的古变化，以了解当前变化和这些变化将来可能如何影响海洋。

31. 二氧化碳在被海洋吸收后会使海水酸化，这反过来又影响到海洋生物。放射性同位素被用于调查海洋生物过程的变化，如钙化、生物矿化和响应这种越来越高的酸度的新陈代谢。

32. 核和稳定同位素技术被用于重建以前的污染事件、跟踪污染趋势和评价污染控制措施的有效性。这些技术还被用于研究引起沿海富营养化的营养物的陆基污染源、区分人为污染物浓度和天然污染物浓度、确定污染源以进行法证学污染研究以及确定与有害藻华有关的生物毒素。

33. 沿海水域的石油污染是石油烃排放造成的一个世界性环境问题。日益需要有灵敏而可靠的方法来监测石油污染及其影响，以及制订为监管目的确定石油污染来源的方法。对石油烃中稳定碳同位素比率的分析被与化学方法结合用于对浮油的指纹识别进行微调，目的是追踪海洋环境中的石油来源。

# 2015 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 2014 年 12 月 31 日，全世界共有 438 座核动力反应堆在运行，总容量达到 376.2 吉瓦（电）<sup>1</sup>（见表 A-1）。这与 2013 年数字比较略有增加，总容量增加约 4.5 吉瓦（电）。

2. 在正在运行的反应堆中，约 81.5%属轻水慢化冷却堆；11.2%属重水慢化冷却堆；3.4%属轻水冷却石墨慢化堆；3.4%属气冷堆（图 A-1）。两座反应堆属于液态金属冷却快堆。

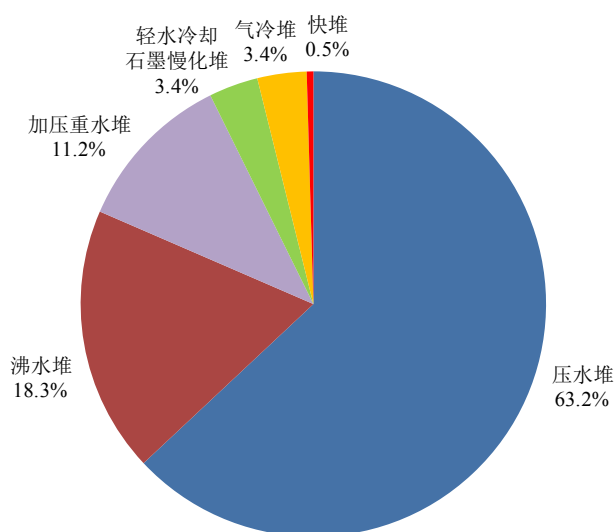


图 A-1. 当前的反应堆类型分布情况。（BWR：沸水堆；FR：快堆；GCR：气冷堆；LWGR：轻水冷却石墨慢化堆；PHWR：加压重水堆；PWR：压水堆）。

3. 在日本，全部 48 台在运反应堆机组 2014 年继续停运。2014 年 11 月，鹿儿岛县知事批准重启仙台 1 号和 2 号机组，这两台机组成为该国由核监管当局按照 2011 年 3 月福岛第一核电站事故后强制实施的新安全标准审核的首批机组。2014 年 12 月，日本原子力规制委员会批准重启高滨 3 号和 4 号反应堆机组。

<sup>1</sup> 1 吉瓦（电）相当于 10 亿瓦（电）。

4. 2014 年，有五座新反应堆并入电网，它们是：阿根廷阿图查 2 号机组（692 兆瓦（电）），中国宁德 2 号机组（1018 兆瓦（电））、福清 1 号机组（1000 兆瓦（电））和方家山 1 号机组（1000 兆瓦（电）），以及俄罗斯罗斯托夫 3 号机组（1101 兆瓦（电））。阿图查 2 号反应堆机组的建设最初始于 1981 年，但被推迟直到 2009 年才重新启动。

5. 2014 年，只有一座反应堆永久关闭。美国的单机组佛蒙特扬基反应堆因财政考虑因素于 2014 年 12 月 29 日停止商业运行。

6. 2014 年仅有三台机组开工建设，它们是：白俄罗斯的白俄罗斯 2 号机组、阿拉伯联合酋长国（阿联酋）的巴拉卡 3 号机组和阿根廷的一种小型一体化加压轻水堆设计 CAREM-25 反应堆。

7. 截至 2014 年 12 月 31 日，共有 70 座反应堆在建。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-2）。在在建的反应堆总数中，有 46 座在亚洲，就如同自 2004 年以来并网的最后 40 座新反应堆中有 32 座在亚洲一样。

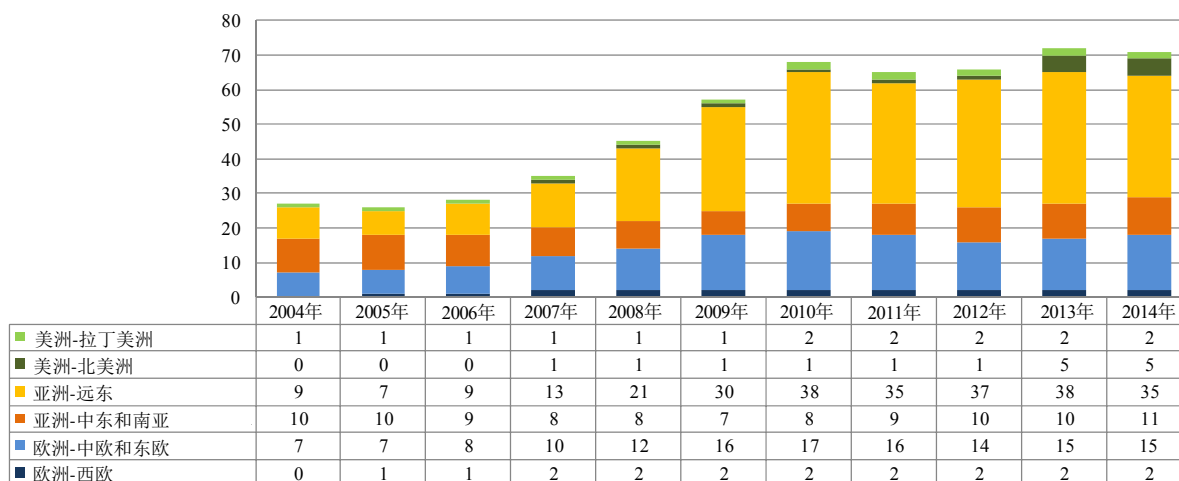


图 A-2. 按地区列出的在建反应堆数量。

8. 2014 年，若干国家在实现首座核电厂目标方面取得了重要进展。在阿联酋，联邦核监管局批准了酋长国核能公司在巴拉卡场址上再建两个机组的申请。巴拉卡 1 号、2 号和 3 号机组已经开工建设，预计到 2017 年、2018 年和 2020 年分别投入运行。

9. 白俄罗斯 2014 年 4 月为其第二台机组浇注了第一罐混凝土，并已开始进入 1 号机组地面以上的建造阶段。这两台机组都是将根据 2012 年 7 月与俄罗斯联邦原子能建设出口公司签署的合同建造的 WWER-1200 型反应堆。

10. 土耳其继续发展其核电计划的基础结构。2014 年 12 月，环境与城市规划部批准对阿库尤四个拟议的 WWER-1200 机组进行环境影响评定。土耳其监管机构于 2014 年 10 月召集了一家技术支持组织，以协助其审查和评定预计将于 2015 年提交的阿库尤建造



许可证申请。继与日本在 2013 年签署政府间协定后，土耳其还正在致力于锡诺普的第二核电站项目，并已开始与伙伴合作进行场址调查和编制技术可行性研究报告。

11. 1 月，波兰部长理事会确认了在能源结构中增加约 6000 兆瓦（电）核电容量的决定以及到 2024 年拥有首个运行机组的计划。

12. 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。越南于 2014 年 11 月接待了“综合核基础结构评审”后续工作组访问，该工作组就越南在其核基础结构发展方面所采取行动的进展情况提供了反馈。肯尼亚、摩洛哥和尼日利亚正式要求将“综合核基础结构评审”工作组访问安排在 2015 年。

表 A-1. 全世界正在运行和建造的核动力反应堆（截至 2014 年 12 月 31 日）<sup>a</sup>

国家	在运反应堆		在建反应堆		2014 年供应的核电量		截至 2014 年的总运行经验	
	机组数	总容量 兆瓦（电）	机组数	总容量 兆瓦（电）	太瓦·小时	占总发电量的 百分数	年数	月数
阿根廷	3	1 627	1	25	5.3	4.1	73	2
亚美尼亚	1	375			2.3	30.7	40	8
白俄罗斯			2	2 218				
比利时	7	5 927			32.1	47.5	268	7
巴西	2	1 884	1	1 245	14.5	2.9	47	3
保加利亚	2	1 926			15.0	31.8	157	3
加拿大	19	13 500			98.6	16.8	674	6
中国	23	19 007	26	25 756	123.8	2.4	181	7
捷克共和国	6	3 904			28.6	35.8	140	10
芬兰	4	2 752	1	1 600	22.6	34.7	143	4
法国	58	63 130	1	1 630	418.0	76.9	1 990	4
德国	9	12 074			91.8	15.8	808	1
匈牙利	4	1 889			14.8	53.6	118	2
印度	21	5 308	6	3 907	33.2	3.5	418	6
伊朗伊斯兰共和国	1	915			3.7	1.5	3	4
日本	48	42 388	2	2 650	0.0	0.0	1 694	4
大韩民国	23	20 717	5	6 370	149.2	30.4	450	1
墨西哥	2	1 330			9.3	5.6	45	11
荷兰	1	482			3.9	4.0	70	0
巴基斯坦	3	690	2	630	4.6	4.3	61	8
罗马尼亚	2	1 300			10.8	18.5	25	11
俄罗斯联邦	34	24 654	9	7 371	169.1	18.6	1 157	3
斯洛伐克	4	1 814	2	880	14.4	56.8	152	7
斯洛文尼亚	1	688			6.1	37.3	33	3
南非	2	1 860			14.8	6.2	60	3
西班牙	7	7 121			54.9	20.4	308	1
瑞典	10	9 470			62.3	41.5	422	6
瑞士	5	3 333			26.5	37.9	199	11
乌克兰	15	13 107	2	1 900	83.1	49.4	443	6
阿拉伯联合酋长国			3	4 035				
英国	16	9 373			57.9	17.2	1 543	7
美利坚合众国	99	98 639	5	5 633	798.6	19.5	4 012	4
总计 <sup>b, c</sup>	438	376 216	70	68 450	2 410.4		16 096	10

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

b. 注：总计中包括中国台湾的下列数据：

在运 6 台机组，5032 兆瓦（电）；在建 2 台机组，2600 兆瓦（电）。

核发电量为 40.8 太瓦·小时，占总发电量的 18.9%。

c. 总运行经验还包括意大利（80 年零 8 个月）、哈萨克斯坦（25 年零 10 个月）、立陶宛（43 年零 6 个月）和中国台湾（200 年零 1 个月）的已关闭核电厂。

13. 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，预计将于 2016 年开工建设。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。2014 年 8 月的“综合核基础结构评审”工作组访问得出了约旦已在发展其核基础结构方面取得进展的结论，并就进一步行动提出了建议。

14. 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知情决策，而一些国家则正在制订自己的能源战略，以便纳入核电方案。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综合性法律和监管基础结构。

15. 能力建设对于确保持续可获得安全、可靠和可持续管理或逐步取消核电计划所需合格人员依然具有重要意义。能力建设的重要性还在 2011 年大会核准的原子能机构“核安全行动计划”中得到了强调，该计划呼吁拥有核电计划的成员国以及正计划启动核电计划的成员国加强、发展、维护和实施其能力建设计划。在 2014 年 5 月在维也纳举行的原子能机构“核电计划的人力资源发展：建设和保持能力”国际会议上，来自 65 个成员国和五个国际组织的 300 多名与会者讨论了全球性的能力建设挑战，并强调了确保可持续供应合格人力资源的重要性。

16. 假冒、欺诈和可疑物项正日益成为营运组织和监管机构的关切事项，假冒、欺诈和可疑物项及相关质量文件的事例正在不断被发现。在某些情况下，作为假冒、欺诈和可疑物项的后果，在运或在建核电厂遭受了很大的经济影响，包括临时关闭电厂。营运组织正在采取越来越多的预防措施，包括提高认识和培训、加强采购规范和检验以及减少聘用经纪人。监管机构正越来越多地要求进行假冒、欺诈和可疑物项（包括电厂安装前发现的这类物项）报告。为了帮助解决这个问题，原子能机构于 2014 年 9 月举行了一次聚焦采购活动和假冒、欺诈和可疑物项的技术会议。它还开始了制订采购工程技术导则的工作。这包括关于如何避免采用假冒、欺诈和可疑物项的建议。

17. 在 438 座在运核动力堆中，有 225 座已经服役 30 年或 30 年以上（见图 A-3）。出现了超出许可证期限的长期运行所适用的电厂寿期管理模式。美国和其他一些成员国所遵循的模式基于许可证展期申请概念。在这个模式中，许可证审批当局发放长达 40 年的运行许可证，每次续展申请可以将许可证期限最多再延长 20 年。截至 2014 年底，在美国 99 座在运反应堆中，总共有 78 座已收到了 20 年的许可证展期。另一种许可证审批模式基于定期安全评审过程，主要用于欧洲的反应堆。在这种模式下，许可证持有者应以固定的间隔开展定期安全评审过程，一般每 10 年一次，以确认许可证审批条款和环境状况。定期安全评审是对所有重要安全方面的全面评审，旨在根据现行许可证审批要求确定和消除各种不足。长期运行的一项主要挑战是制订和实施老化管理计划，以评定基本结构和系统的完整性以及关键部件的剩余寿期。原子能机构编写了一项纲领性导则以及许多具体部件老化管理导则。

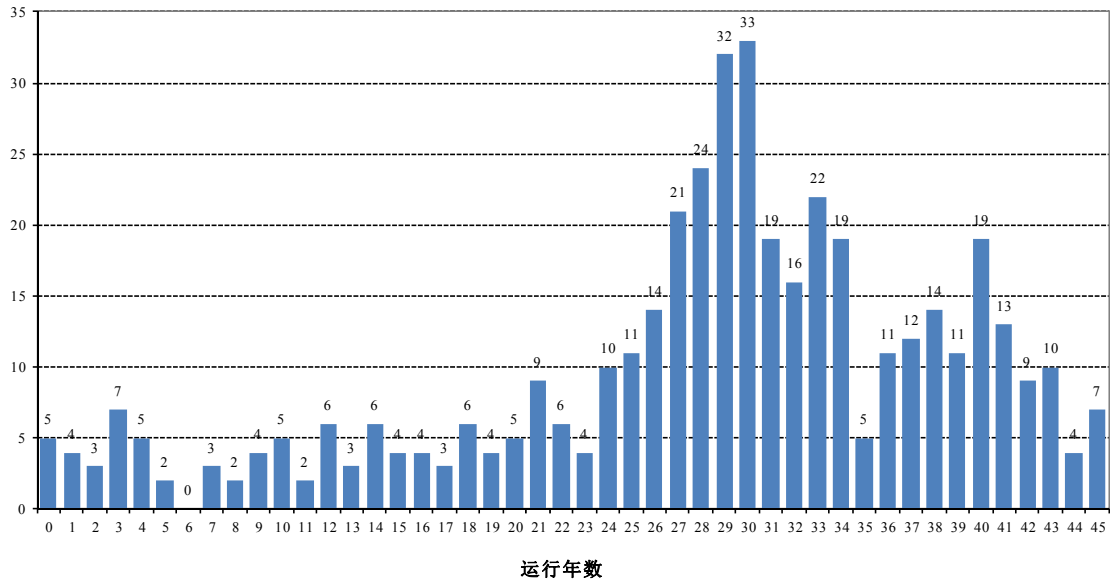


图 A-3. 在运核动力堆截至 2014 年 12 月 31 日按堆龄的分布情况（资料来源：原子能机构动力堆信息系统 <http://www.iaea.org/pris>）。

18. 比利时多伊尔 3 号和蒂昂热 2 号机组在发现反应堆压力容器存在裂纹后于 2012 年被关闭。经过深入调查，并在满足监管要求后，它们已于 2013 年 5 月被重新启动。但进一步的冶金测试导致比利时电力公司于 2014 年 3 月关闭了它们，直至有关反应堆压力容器钢机械强度的中子效应的不确定性得到解决。为了分享就结构完整性所汲取的经验教训，2014 年 9 月在西班牙马德里举办了由能源、环境和技术研究中心主办的侧重于评定核电厂一回路部件降质机理的原子能机构培训班。

19. 由于福岛第一核电站事故引起的安全再评定在许多情况下都导致了额外的资本支出，以满足新的监管要求。这将对核电生产的成本产生影响，并可能影响到长期运行的经济可持续性。为了评定这种经济影响，原子能机构已经着手编写关于核电厂长期运行经济评定方案的新技术导则。

## A.2. 核电增长预测

20. 在原子能机构 2014 年的预测中，到 2030 年，核电装机容量从目前的 372 吉瓦（电）增至少值预测的 401 吉瓦（电）和高值预测 699 吉瓦（电）。这些预测反映了低值预测和高值预测分别为 8%和 88%的正增长。相比 2013 年的预测，2014 年的预测结果是：高值预测要低约 23 吉瓦（电），低值预测要低 34 吉瓦（电）<sup>2</sup>。促成这种下降的因素包括早于预期的反应堆退休、新建延迟以及可归因于实施额外的安全相关修改的成本增加。然而，对核电的兴趣在一些地区依然强劲，在经济和能源需求正在发展的国家尤其如此。持续增长情况表明，支持继续使用核电的基本面没有发生变化。

<sup>2</sup> 这种预测包括现有容量（当前正在向电网供电）和额定装机容量（现有但当前未向电网供电）。

21. 这些预测源自于对逐个国家评定情况的汇总。专家们对原子能机构成员国所有在运的反应堆、可能的许可证更新、计划停堆和预见未来几十年似乎可能的建设项目进行审议。这些预测按照低值预测和高值预测的一般假设通过评定每个项目的合理性做出。它们既不旨在具有预见性，也不旨在反映从最低到最高可行情况未来可能的全部假想方案。

22. 在短期内，预计天然气的低价和有补贴的可再生能源产能的不断扩大将对一些发达世界地区的核增长前景产生影响。这种天然气低价的部分原因是作为宏观经济状况结果的需求低迷以及技术进步。此外，当前的金融危机继续对核电等资本密集型项目构成挑战。专家们采用的设想是，除福岛第一核电站事故以外的上述挑战可能会暂时推迟一些核电厂的部署。发展中世界人口和电力需求增长的基本面、对核能在避免二氧化碳排放方面作用的认识、能源供应安全问题以及化石燃料价格的变化无常均表明，就较长期而言，核能将在能源结构中继续发挥重要的作用。

### 核电已经避免了二氧化碳排放<sup>3</sup>

核电已成为 50 多年来世界电力供应的一部分。作为一个额外的好处，核能能避免二氧化碳排放。图 A-4 显示了全球电力行业二氧化碳排放量以及通过利用水电、核能和其他可再生能源所避免的排放量的历史趋势。图表下方的电力部门显示了过去 40 年所产生的实际二氧化碳排放量。实际值上方显示的增量值代表了核能、水电和可再生能源避免的排放量，2011 年达到近 60 亿吨，即与相对于本应有的总数而言节省了三分之一的二氧化碳排放量。估计这些二氧化碳排放节省量（2.1 亿吨）中有稍多于三分之一的节省量来自核电。

这种对已避免排放量的估计取决于关于本应采用何种替代电力的假设。就避免量估计而言，所作的假设是，所产生的电力本应通过增加利用煤、石油和天然气按照其各自在电力结构中比例的生产的方式来产生。这是一种保守的方法，因为更有可能的是，由于其国内丰富的原因，煤炭本应取代核能。

---

<sup>3</sup> 有关核电和气候变化的更多信息可查阅：  
<http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/publications.html>。

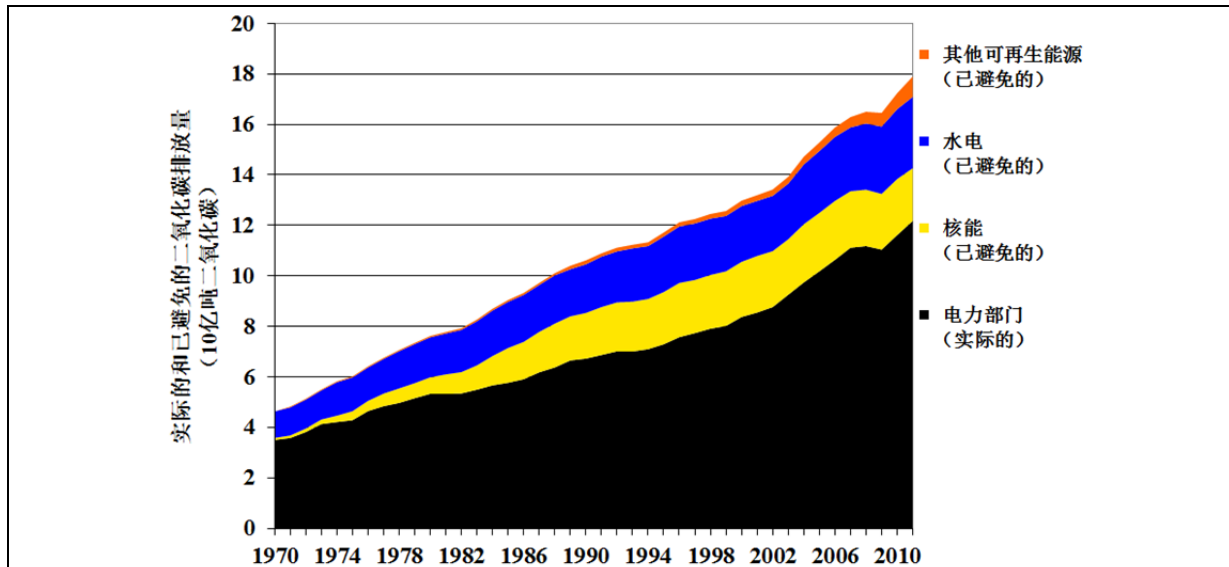


图 A-4. 全球电力部门二氧化碳排放量和利用三种低碳发电技术避免的排放量。（数据来源：基于经合组织国际能源机构《世界能源统计和平衡》（2014 年）<http://dx.doi.org/10.1787/data-00512-en>）

23. 经济合作与发展组织国际能源机构（经合组织国际能源机构）也发表了全球核电增长预测。按照经合组织国际能源机构《2014 年世界能源展望》，在被称为“新政策假想方案”的中间假想方案下，全球核发电容量将在 2030 年达到约 543 吉瓦（电）。这与一年前相比基本没有变化，差不多是原子能机构预测的平均值。图 A-5 对原子能机构 2014 年的预测、经合组织国际能源机构 2014 年假想方案<sup>4</sup>以及世界核协会 2013 年的预测作了比较。三个组织 2020 年和 2030 年的高值假想方案均显示了类似的结果，但 2030 年的低值假想方案预测则显示了相对较高程度的差异。

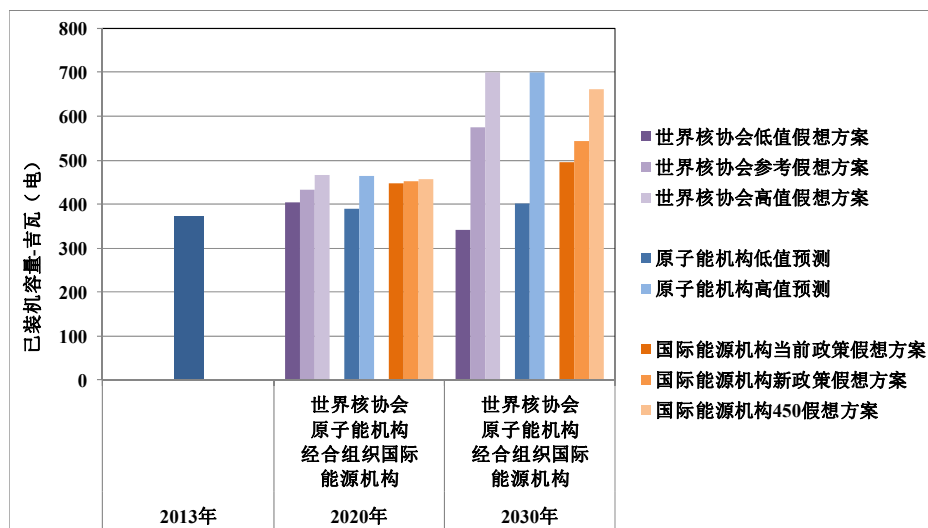


图 A-5. 原子能机构的核电预测与国际能源机构 2014 年预测（基于吉瓦（电）总值）和世界核协会 2013 年预测的比较。

<sup>4</sup> 经合组织国际能源机构的数字系基于吉瓦（电）总值。

## A.3. 燃料循环

### A.3.1. 铀资源和生产

24. 铀现货价格继续下滑，从年初约 90 美元/千克铀下滑到年中 70 美元/千克铀，跌至 10 年低点。不过，到 2014 年 8 月，价格开始回升，到 2014 年 11 月达到 115 美元/千克铀，在年终前略有缓和。虽然有报道在铀勘探和开发上投入大量开支，但许多新的开采项目已被推迟或预计被推迟。

25. 非常规铀资源进一步扩大资源基础。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。2014 年，PhosEnergy 公司宣布，PhosEnergy 工艺示范厂持续的现场运行证实在稳态运行期间已持续达到高的铀回收率 (>92%)。巴西圣基特里亚磷酸盐/铀矿项目仍处于开发阶段，计划于 2016 年开始生产。

26. 海水一直被作为铀的非常规来源进行广泛研究。作为巨大能源的大约 45 亿吨铀以约十亿分之 3.3 的极低浓度溶解在世界海洋中。继续对这一潜在来源进行研究。美国能源部最近的研究进展使回收费用减少了约一半，从 1230 美元/千克铀下降到 610 美元/千克铀。

27. 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，但在能够考虑将其商业使用之前仍需要大量的工作。一些可能作为副产品生产钍和含钍残留物的稀土元素项目预计将在近期投产，尤其是在格陵兰岛的 Kvanefjeld 地区（丹麦王国）。托尔能源公司在挪威哈尔登继续其为期五年的钍混合氧化物燃料试验计划。

28. 世界核协会估计 2012 年的铀产量为 58 394 吨铀，2013 年为 59 370 吨铀。2014 年，由于加拿大雪茄湖矿和澳大利亚四里矿开业，以及作为芬兰塔尔维瓦拉镍生产的副产品启动铀生产和美利坚合众国两座新的地浸矿进行调试，预计产能增加约 7530 吨铀。然而，由于塔尔维瓦拉项目现被搁置和雪茄湖由于技术原因采矿作业暂时停止，实际增长将更低。

29. 仍作为主导方法的地浸生产比例预计在中期继续增加。据世界核协会报告，地浸采矿占 2013 年世界总产量的约 46%，主要来自哈萨克斯坦（2013 年占世界总产量的 38%）。由于不利的市场状况，哈萨克斯坦开发新矿床一直被搁置，2014 年产量将维持在 2013 年的 22.5 万吨铀的水平。

30. 加拿大雪茄湖矿于 3 月开始生产。然而，由于持续的技术挑战，采矿作业于 2014 年 7 月被暂停。年生产能力目前为 5000 吨铀/年，预计于 2018 年开始增加至 8000 吨铀/年以上。2014 年 10 月，在麦克柯林湖选冶厂利用雪茄湖矿开采的铀矿生产出首批铀浓缩物（图 A-6）。该选冶厂目前正寻求批准使许可容量增加到 9200 吨铀。作为“千年铀矿开采项目”的一部分在萨斯喀彻温省北部阿萨巴斯卡盆地建造和运行一个新的地下铀矿的申请已被正式撤销，理由是市场状况不佳。





图 A-6. 加拿大麦柯柯林湖选冶厂利用雪茄湖矿开采的铀矿生产出首批铀浓缩物。  
(照片由加拿大能源和矿产公司提供)

31. 在纳米比亚，由于市场状况，所有目前经营的矿山和选冶厂都在减产，而且除 Husab 铀矿外，所有其他矿山开发项目都已被搁置，等候更有利的市场条件。Husab 铀矿建设继续进行，预计在 2015 年前开始运行，到 2017 年，满额生产能力可能达到 5770 吨铀。Rössing 铀矿的加工作业由于浸出槽故障短暂中断后已恢复。中国核工业集团公司（中核集团公司）收购了纳米比亚蓝格·海因里希铀矿 25% 的股份。

32. 生产能力为 5000 吨铀的尼日尔新矿 Imouraren 原预计在 2015 年启动，现由于市场状况可能推迟到 2017 年。Madaouela 项目最早可在 2017 年投产，可利用资源中的 39 600 吨铀和作为露天矿可开采的 Miriam 矿床的另外 11 260 吨铀生产 1040 吨铀/年。

33. 2014 年 5 月，低迷的市场价格导致马拉维帕拉丁能源公司的 Kayelekera 铀矿生产停顿。在市场价格改善之前，生产可能在大约 9 个月的筹备期内重新开始。博茨瓦纳莱特拉卡内铀矿正在进行详细的可行性研究，目标是在 2015 年完成，预计在 2017 年开始首批生产。对于毛里塔尼亚伊斯兰共和国的 Reguibat 铀矿项目，已完成范围界定研究。

34. 在澳大利亚，Quasar 资源公司开始在四英里东矿进行地浸采矿作业。西澳大利亚州环境保护局建议国家批准加拿大能源和矿产公司与三菱的金泰尔联合项目。开发决定将取决于未来的市场状况。2013 年底浸出槽发生破裂的 Ranger 铀矿，于 2014 年 6 月重新启动储存矿石加工作业。Ranger-3 Deeps 铀矿生产预计于 2015 年开始。奥林匹克坝铀矿正在规划铜和铀矿的堆浸试验，作为替代 2012 年放弃的原扩展计划的一个低成本选择方案。

35. 在美国，怀俄明州的失溪铀矿项目于 2014 年投产。

36. 巴西期望 2015 年在 Engenho 铀矿开始新的露天开采作业。该矿山预计每年生产约 286 吨铀。矿石将在现有的卡埃蒂特选冶厂加工，该厂还计划于 2015 年开始将生产能力扩大到总计 670 吨铀/年。

37. 在土耳其，已完成对 Temrezli 地浸项目的预可行性研究，并颁发了必要的开发许可证。生产预计于 2016 年开始，年产量为 385 吨铀。2014 年 4 月，向西班牙雷托尔蒂略的一个铀矿颁发了采矿许可证，如果该铀矿对核条例的遵守在许可证审批期间得到



证实，则可能导致颁发核燃料循环设施许可证。罗马尼亚打算在该国东部地区开启一个新的铀矿，因为当前运行的 Crucea 矿山资源已枯竭。

38. 约旦在宣布重新评估该国中部地区的资源后，计划投资 1.4 亿美元开发铀开采项目。该项目初始生产能力将为 300—400 吨铀/年，可扩大至 1500 吨铀/年，预计将在 4—5 年内投入运行。

39. 在格陵兰岛（丹麦王国），正在进行可行性研究，以评价在 Kvanefjeld 地区生产铀、稀土元素和锌。如果该项目按计划如期进行，预计于 2016 年开始作为副产品生产 425 吨铀/年。

40. 伊朗伊斯兰共和国宣布，萨甘德铀矿正处于开发的最后阶段。将采用露天和地下方法开采铀，开采的矿石将在阿尔达坎附近的选冶厂进行加工。

41. 世界核协会估计，2014 年铀生产提供了约 92% 的预计反应堆铀消耗量（70 015 吨铀）。这比过去的几年高得多，主要由于来自军事库存的主要二次供应源结束，即俗称的“高浓铀交易”或“兆吨换兆瓦计划”在 2013 年结束。其余 8% 则由以下四个二次来源提供：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 2013 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 590 万吨铀的使用期限将为 84 年。

### A.3.2. 转化、浓缩和燃料制造

42. 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。当前的转化服务需求总量（假设铀-235 浓缩尾料丰度<sup>5</sup>为 0.25%）每年在 6 万至 6.4 万吨铀之间。

43. 法国阿海珐集团正在以由马勒维西和特里卡斯坦设施组成的新的 COMURHEX II 项目替换 COMURHEX I 的现有铀转化能力，COMURHEX I 拟于 2015 年关闭。为了提升其转化能力，俄罗斯联邦 TVEL 燃料公司计划于 2015 年开始在西伯利亚化学联合集团建设一个新的中心，预计 2018 年开始一期调试，2020 年开始二期调试。

44. 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。开展商业浓缩服务有五家公司：中核集团公司（中国）、阿海珐集团公司（法国）、国家原子能公司（俄罗斯联邦）、美国能源公司（美国）和铀浓缩公司（欧洲和美国）。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

---

<sup>5</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。

设施。阿根廷正在皮尔卡尼耶乌重建气体扩散能力。

45. 位于新墨西哥州的美国铀浓缩公司铀浓缩厂二期于 2014 年开始全面运行，生产能力为 370 万分离功单位，加上 2010 年 6 月开始运行的一期，在 2012 年满额生产能力达到 160 万分离功单位。三期建设已在进行中，到 2022 年建成后，将使该厂总生产能力达到约 570 万分离功单位。

46. 美国铀浓缩公司是美国唯一在运的铀浓缩厂。美国计划再建造三个浓缩厂。阿海珐正在计划在爱达荷鹰石建造一座 330 万分离功单位的离心厂。全球激光浓缩公司正在计划在北卡罗来纳州威尔明顿建造一座 600 万分离功单位的激光浓缩厂。两个厂均预计在 2020 年以前开始运行。2009 年被搁置的美国能源公司的美国离心分离厂将开始一个新的研发计划，即美国离心机技术示范和运营计划，该计划将进行到 2015 年年底。这是为了维持美国离心机项目技术和补救 2014 年美国离心分离厂离心机出现的一些技术缺陷。

47. 由巴西核工业公司运行的雷森迪铀浓缩厂将提供 2015 年安格拉 1 号核电厂换料所需浓缩铀的 80%。巴西核工业公司计划将供应比例逐渐扩大到 100%。有关满足所有巴西核反应堆浓缩需求的研究正在进行中。

48. 贫化六氟化铀<sup>6</sup>被去氟转化为氧化铀或四氟化铀，以便以更稳定的形式进行贫铀的长期贮存。2014 年，当前全球总去氟转化能力仍保持在每年约 6 万吨六氟化铀。目前，主要在运设施是阿海珐的法国特里卡斯坦厂、美国朴茨茅斯和帕迪尤卡两座铀处置服务厂，以及俄罗斯联邦西伯利亚泽列诺戈尔斯克电化厂的 W-ECP 去氟转化厂。在美国，由国际同位素公司运行的新墨西哥厂正在建设中。2010 年铀浓缩公司英国 ChemPlants 公司收到对尾料管理设施的监管和规划批准书并希望于 2016 年启动。该设施将处理铀浓缩公司的欧洲贫化铀副产品库存，将包括一座六氟化铀去氟转化厂和一些贮存、维护和残留物处理设施。

49. 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。全球燃料总制造能力就轻水堆燃料而言目前约为每年 1.35 万吨（浓缩铀），就加压重水堆燃料而言约为每年 4000 吨（天然铀）。对于天然铀加压重水堆燃料，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。

50. 在得到监管部门的批准后，中国的田湾 1 号机组（水冷和水慢化动力堆）已经开始使用 TVEL 燃料公司新的 TVS-2M 燃料，这种燃料允许在堆芯延长使用长达 18 个月。这种燃料类型已经用在俄罗斯联邦的巴拉科沃和罗斯托夫核电厂。田湾 2 号机组

---

<sup>6</sup> 为了制造浓缩铀燃料，浓缩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。

也将被转换为使用这种燃料。将在中国的宜宾燃料厂制造仍在建设中的田湾 3 号和 4 号机组的 TVS-2M 燃料。

51. 置于燃料棒组件内以监测堆芯功率和温度分布的热声 neutron 传感器正在美国由西屋公司研制。这些传感器可以帮助电厂操纵员更准确地监测堆芯，从而更高效地使用燃料，并且还可以监测燃料棒的缺陷和安全问题。这种器件原型将在 2015 年进行测试，预计在 2019 年前投入更广泛的商业使用。

52. 利用碳化硅制造核燃料部件的新技术已经在日本由东芝公司和揖斐电公司开发，以期发展耐受事故燃料，特别是作为轻水反应堆锆合金包壳的替代物。已开发原型燃料组件套罩，将于 2016 年在研究堆开始测试。

53. 再循环作业通过使用堆后铀和混合氧化物燃料提供二次核燃料供应。目前，在俄罗斯联邦埃列克特罗斯塔利每年为阿海珐集团公司生产约 100 吨堆后铀。阿海珐集团在法国罗芒厂的一条生产线每年将约 80 吨重金属堆后铀转化成供法国轻水堆使用的燃料。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，在印度、日本和俄罗斯联邦则有一些较小型设施。

54. 印度和俄罗斯联邦制造供快堆使用的混合氧化物燃料。在俄罗斯联邦列兹诺戈尔斯克正在建设一座为 BN-800 快堆提供燃料的混合氧化物燃料制造设施（克拉斯诺亚尔斯克-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奥焦尔斯克的马雅克工厂建设了中试设施。在原子反应堆研究所的混合氧化物燃料制造厂最近进行了现代化，生产防震包装混合氧化物燃料。已为今年达临界的别洛雅尔斯克 4 号 BN-800 快堆制造了首批 56 根混合氧化物燃料组件。Atomstroy 核建造技术研究设计院为生产混合氧化物燃料组件开发和制造了远程操作焊接系统。新系统将被用于列兹诺戈尔斯克的混合氧化物燃料制造设施。

55. 为将建在俄罗斯联邦西伯利亚化学联合集团的 BREST-300 实验快堆生产燃料的中试厂已开始建设。对利用混合铀钚氮化物燃料制造的 TVS-5 燃料组件的测试也已完成（图 A-7）。BREST-300 的建设计划于 2016 年开始，预计在 2020 年完成。BREST-300 是由动力工程研究与发展所开发的一种铅冷却反应堆系统。



图 A-7. 先进 BREST-300 反应堆的原型燃料 — TVS-5 燃料组件。（照片由西伯利亚化学联合集团提供）

56. 在美国，有关南卡罗来纳州萨凡纳河场址上已部分建成的混合氧化物燃料制造设施的建造许可证已被展期 10 年，美国国会已经批准持续建造所需的资金。

### 供应保证

57. 2010 年 12 月，理事会核准在哈萨克斯坦建立原子能机构低浓铀银行。自此以来，原子能机构秘书处一直致力于建立该银行的财政、法律和技术安排。这包括对拟议容纳原子能机构低浓铀银行设施的综合技术评定。2014 年，评定了地震安全对整个原子能机构低浓铀银行项目的计划影响，以确定紧邻原子能机构低浓铀银行建议场址存在的地质断层是否潜在地影响原子能机构低浓铀银行的安全。由一家国际地震工程咨询公司独立审查的这项“计划风险评定”的结论是，通过适当的工程措施可以确保原子能机构低浓铀银行的地震安全，即便在为“计划风险评定”设想的极端地震事件假想情况下也可以确保这种安全。基于“计划风险评定”的结果，原子能机构和哈萨克斯坦有把握地得出结论认为，可以在乌尔巴冶金厂场址建立原子能机构低浓铀银行。根据 2011 年 2 月俄罗斯联邦政府和原子能机构的协定在俄罗斯联邦安加尔斯克建立的低浓铀储备库继续保持运行。<sup>7</sup>

### A.3.3. 核燃料循环后端

58. 动力堆乏燃料管理采用两种不同的战略。或者将乏燃料贮存起来，随后进行后处理，提取可用材料（铀和钚）用于新燃料制造；或者将乏燃料贮存，等待在深地质处置库中处置。通过后处理进行的再循环使得能够最终减少需处置的高放废物数量，以及最大程度利用易裂变材料进行能源生产。目前，中国、法国、印度、俄罗斯联邦和英国等国家对乏燃料采取后处理，而芬兰和瑞典等其他国家已选择在自愿的东道社区处置乏燃料。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战略有关的最新发展情况。

59. 欧盟理事会 2011/70/Euratom 号指令从法律上对欧盟成员国制订和维持乏燃料和放射性废物管理政策进行了约束。该指令规定了每个欧盟成员国在国家框架、主管监管当局、许可证持有者、专门知识和技能、财政资源、透明度和报告等方面必须遵守的规则。每个欧盟成员国均须对管理在其国内产生的乏燃料和放射性废物担负最终责任。2014 年，欧洲科学院科学咨询委员会发布了《乏核燃料及其废物的管理》报告，向决策者通报了在制定相关国家计划时要考虑的重要问题。报告的结论认为，燃料循环政策应当考虑：(1) 所有燃料循环的长时间周期（超过 100 年），因此有利于产生涵盖整个过程的强有力技术解决方案，但保持替代方案可用，以适应未来政策和计划的变化；(2) 未来选择的灵活性；(3) 来自快中子反应堆再循环的潜在改进；(4) 国家或地区的深地质处置解决方案；(5) 支持乏核燃料长期安全管理所需的教育和培训。

60. 美国能源部核能办公室 2014 年发布了有关核燃料循环评价和筛选研究的最终报告。这项为期三年的研究确定了支持核燃料循环研发决策的“框架”（包括成套数据、

---

<sup>7</sup> 《2012 年核技术评论》描述了目前已建立的其他供应保证机制。

方法和工具的逻辑结构和过程)。它确定了四个最有前途的选择 — 所有选择都是利用铀基燃料快堆的持续再循环燃料循环 — 和这些燃料循环需要的研发, 以及可能会提高性能的 14 个其他潜在有前途的燃料循环。

61. 美国在 2014 年批准了一项新的法规, 即《乏核燃料持续贮存规则》, 根据这项法规, 乏燃料在超出反应堆的许可寿期后, 可以安全地贮存在乏燃料池和干法屏蔽容器中, 直到在深地质处置库永久处置。该新规则及其有关的《乏核燃料持续贮存通用环境影响报告》取代 2010 年《废物置信裁决和临时贮存规则》。美国核管理委员会(美国核管会)将恢复对新反应堆的许可证审批和对老反应堆许可证展期的办理, 这些事项在上述新法规出台前被暂停了两年。

62. 在大韩民国, 一个独立专家小组向乏核燃料管理公众参与委员会提供了一份报告, 其中就各种中长期乏核燃料管理方法包括永久处置、再循环、后处理和贮存向研究人员提出了建议。该小组还建议及时建立采用干法贮存的新的临时乏燃料贮存设施。乏核燃料管理公众参与委员会是 2013 年建立的临时咨询机构, 旨在征求对乏燃料管理具有各种想法的专家意见, 它定于 2015 年 6 月之前向政府提交政策建议。

63. 2014 年, 从所有核电厂大约卸出了 1 万吨重金属乏燃料。全球累计卸出的乏燃料总量约为 380 500 吨重金属, 其中约 258 700 吨重金属贮存在堆内或离堆场址设施。在全球卸出的乏燃料累积量中, 有不到三分之一已进行了后处理。2014 年, 分布在五个国家(法国、印度、日本、俄罗斯联邦和英国)的全球商业后处理设计能力约为每年 4800 吨重金属。不过, 并非所有这一能力都在运行。

64. 2014 年, 英国塞拉菲尔德的镁诺克斯后处理厂迎来运行 50 周年纪念。该厂至今已后处理超过 5 万吨铀, 相当于所有其他厂的总和。预计在 2017 年结束运行(图 A-8)。



图 A-8. 塞拉菲尔德镁诺克斯后处理厂完成运行 50 年。(照片由塞拉菲尔德有限公司提供)

65. 预定 2014 年完成的日本六所村后处理厂将推迟至 2016 年, 以满足国家监管要求。

66. 2012 年开始运行的俄罗斯联邦列兹诺戈尔斯克集中干法乏燃料贮存设施目前正在被扩大。总共将有三个厂房, 贮存能力就高功率通道式反应堆和水水动力堆乏燃料而言约为 3 万吨铀。用于水水动力堆乏燃料贮存的二期将于 2015 年进行调试。RT-2 后



处理厂预计在 2021 年前投入运行，以进行 WWER-1000 燃料后处理。

67. 2014 年中国中核集团公司与加拿大坎杜能源公司签署了一项有关建造先进燃料坎杜反应堆的合资企业协议框架。先进燃料坎杜反应堆将被设计成利用再循环铀或钚作为燃料，从而减少乏燃料存量 and 大幅减少所需的新燃料。四座常规压水堆的乏燃料能够完全供应一台先进燃料坎杜反应堆机组（以及为混合氧化物提供再循环铀）。

68. 乌克兰开始建设中央乏燃料贮存设施，该设施将为位于南乌克兰、罗夫诺和赫梅利尼茨基场址的 WWER-1000 和 WWER-440 反应堆产生的乏燃料提供离堆场址贮存。设施将位于切尔诺贝利禁区内重新安置的 Stara Krasnytsya 村、Buryakivka 村、Chystohalivka 村和 Stechanka 村之间，将有利于该禁区的生态恢复和一些土地经济活动的重生。该设施预计在 2017 年前投入运行。

69. 2014 年 11 月 5 日，移出了贮存在福岛第一核电站 4 号机组乏燃料池内的所有 1331 根乏燃料组件。这些乏燃料已被转移到位于反应堆场址的共用乏燃料池，而该反应堆场址较旧的组件被转移到该反应堆场址的金属屏蔽容器中进行干法贮存。

#### A.3.4. 退役、治理和放射性废物管理

70. 将任何形式的核技术用于能源生产、研究活动、医疗和工业应用都伴随着安全管理所产生的放射性废物以及规划相关的未来退役和环境治理活动的义务。了解当前的放射性废物存量状况即容量、场所、条件和特性以及未来的废物产生趋势对于充分规划所需的废物管理设施和活动至关重要。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。

71. 在原子能机构大会第五十八届常会期间举办的科学论坛强调了制订全面、综合、“从摇篮到坟墓”的放射性废物管理方案的必要性，并突出强调了存在可供执行的解决方案（图 A-9）。



图 A-9. 实际上，所有成员国都不得不管理某种形态的放射性废物。  
橙色：其存量主要源于生产核电的成员国。  
蓝色：其存量主要源于研究堆的成员国。  
绿色：其存量主要由弃用密封放射源组成的成员国。

## 全球放射性废物存量估计

72. 全球放射性废物存量估计基于成员国向原子能机构“网基废物管理数据库”自愿提供的信息（表 A-2）。原子能机构与欧洲委员会和经合组织核能机构合作发起了一个状况和趋势项目，以制订一个可适用于所有成员国的报告义务的准确、精简的国家报告程序。与此相一致，正在对“网基废物管理数据库”进行改进，以允许更准确地估计全球存量。

73. 截至 2014 年 12 月，全世界有用于管理这些废物存量的 467 个贮存设施和 154 个废物处置设施正在运行、被暂停或被关闭<sup>8</sup>。

表 A-2. 2014 年全球放射性废物存量估计数<sup>9</sup>

废物分类	贮存 <sup>10</sup> [立方米]	累积处置量 [立方米]
极低放废物	173 000	273 000
低放废物	56 703 000	65 192 000
中放废物	8 745 000	10 589 000
高放废物	2 745 000	72 000

资料来源：网基废物管理数据库（2013 年）、正式国家报告和公开可得数据。

## 退役

74. 截至 2014 年 10 月 31 日，世界各地有 438 座核电站正在运行，另有 149 座被关闭或正在进行退役，其中包括 17 座已经完全退役。还有大量的燃料循环设施：300 多座正在运行，约 170 个已经关闭或正在进行退役，125 个已完全退役。就研究堆而言，有 247 座正在运行，180 多座已经关闭或正在进行退役，300 多座研究堆和临界装置已完全退役。

75. 自本世纪之交以来，已经取得大量退役经验，取得最大进展的主要是有长期运行的核电计划的国家，特别是法国、德国、俄罗斯联邦、西班牙、英国和美国。2014 年在退役方面取得实质性进展的计划的例子包括：法国在拆除第一代核电站方面持续取得进展；西班牙在何塞·卡夫雷拉核电厂一座反应堆的废物分割和整备方面持续取得进

<sup>8</sup> 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/>。

<sup>9</sup> 表 A-2 中的数字系估计数，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。最近的更新基于以往的存量和预计年废物产生量报告。由于以下因素所致，连年的估计贮存量也存在内在差异：(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。

<sup>10</sup> 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。这能够导致连年的估计贮存量出现偏差。

展；英国拆除在 1957 年反应堆火灾中受到污染的温斯克尔 1 号堆烟囱中的过滤器通道（图 A-10）；美国三个正在实施的核电厂退役计划。在保加利亚、立陶宛和斯洛伐克也在进行类似的项目，它们的核电厂在设计寿期结束前被关闭。

76. 由于目前正在运行的许多核设施都在 20 世纪 70 年代和 80 年代期间交付运行，并将在未来的 20 年之内达到其设计寿期的终点，因此，预计未来几十年会有大量退役活动。



图 A-10. 温斯克尔 1 号堆烟囱中的过滤器通道退役。（照片由塞拉菲尔德有限公司提供）

77. 核事故后关闭的核电厂的退役活动对若干国家具有挑战性，其中包括日本（福岛第一核电站 — 见插图）和乌克兰（切尔诺贝利）。随着新安全封隔设施建造物的安装，在切尔诺贝利核电站已经取得了显著的进展。新安全封隔设施应在 2015 年充分安装到位，以覆盖受损的 4 号机组，其首要目标是防止放射性物质释放到环境中，并允许将来部分拆除旧的结构。

## 治理

78. 一些国家正在推动处理受以往实践和事故影响的土地治理问题，并相应地建立了适当的技术资源和专门知识。但许多国家的计划仍然面临着阻碍治理计划实施的巨大挑战。2013 年启动的“实施退役和环境治理的制约因素”项目项下的基准报告已经完成，该项目旨在帮助克服这些制约因素。报告确定了四大类障碍：(1) 国家政策、法律和监管框架；(2) 财政制约因素，包括物流、资源和可用资金管理；(3) 技术和基础设施的障碍；(4) 需要在整个退役和环境治理项目的规划和实施周期内加以处理和强调的利益相关方问题。为了克服这其中的一些障碍，基准报告还确定了可以从加强计划间协作中受益的战略。然而，还需要进一步的创新解决方案。

79. 一项显著的成就是发展了场址表征移动装置。这种移动实验室概念提供了一种交互式的快速有效场址表征能力，能够对高度关注的区域进行直接实时识别。该装置可以成为没有足够分析实验室基础设施成员国的一项资产。它还可以对拥有分析实验室能力但可能会面临较大的、未预见到的表征挑战的成员国起到帮助作用。向成员国提供该装置是对表征受污染场址提供支持的有效途径，而表征受污染场址是治理项目实施的一个关键步骤。



## 处理福岛第一核电站事故后果：放射性废物管理、退役和治理

福岛第一核电站事故给无论厂内还是广大的厂外区域都带来了与退役、治理和放射性废物管理有关的重要挑战。在与国际社会合作和寻求在原子能机构主持下的国际评审工作组建议的过程中，日本在这些领域取得了良好的进展。

剩余新鲜燃料和乏燃料的管理是最重要的核电厂退役活动之一。将 4 号机组燃料池中的乏燃料和新鲜燃料移到厂内共用池是这一年实施的一项重要任务。

在利用液体废物处理技术去除在该设施所收集的近 40 万吨放射性水中的放射性核素污染物方面继续取得进展。铯目前采用两种不同的离子交换系统被去除，而东京电力公司最近启用了一种被配置成可直接安装在废物产生或贮存场所的移动和可运输形式的锶去除系统。还在多放射性核素去除系统的性能方面做了种种改进，以用于去除锶以及铯去除后剩余的其他放射性核素。通过将目前 750 立方米/天的能力提高到 2000 立方米/天，东京电力公司预计将加速净化不断累积的污染水。今年以来，三菱综合研究所一直承担探索新的先进现场技术，以净化港口海水中的铯和锶。

治理工作呈现了良好的进展。在治理活动与重建和振兴的努力之间还进行了良好的协调。正在积累从治理工作中汲取的经验教训，与国际社会分享它们也是至关重要的。这种经验教训包括：促进注重个人剂量率的公众辐射防护；通过传达关于去污效果的明确信息和新发现，加强风险交流；提高去污活动的效率和效能；加强全面的政策，以保护个人免于电离辐射的不良影响，同时缓解公众的焦虑和恢复他们的安全感。

福岛县政府同意在靠近福岛第一核电站厂址的一个厂址接受一个临时贮存设施。这将允许将来自近 1000 个临时贮存场址的放射性废物和受污染土壤转移并合并在一个地方。

## 遗留放射性废物

80. 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。迄今已有 197 艘退役核潜艇由俄罗斯联邦及其国际伙伴进行了燃料拆卸和拆除。燃料拆卸后的潜艇反应堆装置目前正处在进行密封的过程中，76 个装置已被置于该国西北和远东的长期贮存设施中。西北地区所有遗留放射性废物整备和贮存地区中心建设工作已于 2014 年 12 月在德国的援助下完成（图 A-11）。已经开发了用于具有液体金属冷却剂堆芯的安全卸料及其随后的贮存技术。在法国的援助下，在马雅克对用于处理有缺陷的乏核燃料密闭容器的热室进行了调试。对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进行退役的联合国努力正接近圆满完成。原子能机构和俄罗斯联邦国际核遗留问题倡议专家联络组主席之间在 2014 年 12 月进行的审查预测，该专家联络组的活动将在 2015 年夏季前完成。



图 A-11. 俄罗斯联邦西北部放射性废物整备和长期贮存地区中心（左）和反应堆装置贮存库（右）。（照片由北方能源有限公司提供）

## 放射性废物处理和整备

81. 放射性废物一旦产生，就必须减少体积，并转换成一种形式，既可以为安全贮存和处置所接受，也允许进行处理和运输。

82. 固态、液态和气态废物处理技术在许多成员国已经相当成熟并投入使用。在美国能源部爱达荷国家实验室场址，一种新型流化床蒸汽重整技术目前正处在调试阶段，目的是处理高浓铀燃料后处理所产生的约 330 万公升高放废液。利用等离子体处理固体废物导致产生较高的减容因子，这种做法正变得越来越普遍，保加利亚科兹洛杜伊核电厂目前正在建造一座等离子体处理设施。

83. 废物整备包括放射性核素的固化、将废物放入包装容器中和提供附加包装。在斯洛伐克博胡尼斯废物处理厂，地质聚合物矩阵继续显示有望对难处理的废物流如对已使用过的有机离子交换树脂进行固化。高放废物需要高度耐用废物体，而且通常经过玻璃固化。但建议采取一种替代整备技术，即热等静压技术，以产生用于处置爱达荷国家实验室场址目前贮存的 4400 立方米高放废物煅烧的废物体。在澳大利亚，正在计划建造一座设施，以处理过去、当前和未来制造钼-99 和医学应用中使用的其它同位素所产生的废物。这家工厂将煅烧这种液体，并将放射性废物固定在适合贮存和处置的一种耐用固体岩石类材料（合成岩石）中。

84. 在遗留设施方面，在英国塞拉菲尔德取得了显著的进展，开始重新包装中试乏燃料贮存池遗留的全密封燃料，对第一代镁诺克斯贮存池中的放射性污泥进行再悬浮，并开启了用于贮存中放废物的新的 3 号封装产品贮存库。

## 放射性废物处置

85. 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、瑞典和美国）和干旱地区低放废物的深沟处置（如在阿根廷、印度、南非和美国）；处置低放废物的近地表专设设施（如在中国、捷克共和国、法国、印度、日本、波兰、斯洛伐克、西班牙和英国）；处置中低放废物的地下专设设施（如在芬兰和瑞典）；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）。

86. 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。

87. 加拿大推进发展两个深部地质处置库的工作。加拿大最大的核事业公司安大略电力公司建议在安大略省金卡丁的布鲁斯核场址为其低放废物和中放废物建造一个深部地质处置库。该项目目前正处于联邦监管审查过程。根据 2002 年《核燃料废物法》设立的加拿大核事业公司所属组织加拿大核废物管理组织目前正在与 11 个感兴趣的社区一道开展选址过程，以确定一个愿意并具备安全和适当场址来接纳用于该国核燃料废物长期管理的深部地质处置库的社区。

88. 中国目前预见到的地质处置需求为来自 48 座反应堆的 14 万吨乏燃料的后处理。处置将在结晶质或沉积物宿主地层进行选址，计划在北山地区进行第一个地下研究设施的建设工作。该地下研究设施预期产生的结果将有助于未来就实施深部地质处置做出知情决策。

89. 法国国家放射性废物管理机构对 2013 年进行的正式国家公共利益相关者参与过程的结果以及从其监管机构获得的反馈做了评定。它计划在 2017 年提交许可证申请，并计划让利益相关者更多地参与其决策，特别是参与其业务的总体计划。

90. 为了落实 2013 年 6 月适用于处置发热放射性废物的“处置库场址选择法令”，德国在 2014 年成立一个新的委员会。该委员会预计在 2016 年前提出的建议应该包括选址标准和对利益相关者参与的要求。

91. 2014 年，英国政府发表了题为“实施地质处置”的白皮书，其中对较高活度放射性废物的长期管理框架作了阐述。白皮书概述了确定可能的地质处置设施场址的方法，其基础是与感兴趣的团体进行合作，一开始用两年的时间采取行动，以解决利益相关者表示对他们很重要的各种问题。

92. 在美国，2014 年报告在地质处置领域出现了若干重要的发展。美国核管会在其“安全评价”<sup>11</sup> 中怀着合理的预期发现，美国能源部已证明遵从了美国核管会对关闭后安全的监管要求。

93. 美国核未来蓝带委员会认识到了深钻孔处置概念在安全和有效处置核材料方面可能发挥的作用。该概念预见将进入结晶基底岩的钻孔（或系列钻孔）钻到地表下约 5000 米的深度。美国能源部正提议进行一次演示。

94. 此外，在发生两起不相关的事件后，美国能源部废物隔离中间工厂的运行已经受

---

<sup>11</sup> 《与内华达州尤卡山地质处置库高放废物处置有关的安全评价报告：永久关闭后的处置库安全》（NUREG-1949，第 3 卷）。

到其监管机构即环境保护署的详细审查（图 A-12）。第一起是一辆卡车起火，没有造成任何放射性后果。调查认定缺乏日常维护和正确的地表下工作安全文化，并需要采取与运行安全有关的整改措施。第二起事件被认为是由废物的不相容组合引起的，并导致了由于处置过的废物包装容器放热反应引起的放射性释放。由此产生的照射量远低于环境保护署《清洁大气法令》规定的监管限值。美国能源部公布了废物隔离中间工厂的恢复计划，该计划旨在到 2016 年第一季度恢复有限的处置作业。

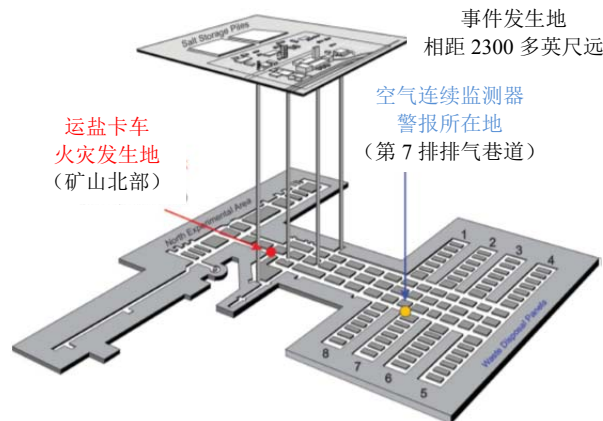


图 A-12. 废物隔离中间工厂 2014 年两起事件发生地。（图形由美国能源部废物隔离中间工厂提供）

## 弃用密封放射源的管理

95. 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，其中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。已经编写了适用于三类至五类源钻孔处置的通用安全论证文件，适用于一类和二类源钻孔处置的通用安全论证文件正在编写之中。

96. 2014 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。在哥斯达黎加部署了移动热室，以便对五个高活度弃用密封放射源进行整备和移走进行再循环。摩洛哥的五个高活度一类和二类弃用密封放射源被合并并返还到法国。在包括喀麦隆和黎巴嫩在内的若干成员国启动了将法国制造的一类 and 二类弃用源进行返还的工作，返还定于 2015 年上半年进行。

97. 在建立移动热室与钻孔处置设计概念之间的联系以便最大程度地减少源的操作和防止不必要的运输方面取得了良好进展。

98. 在斐济、马来西亚和黑山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。

99. 原子能机构将访问《国际密封放射源和装置目录》的范围扩大到各国的许多被提名人员，从而促进了对野外发现的弃用密封放射源的识别。2014 年发起了为源和装置添加更多细节的努力，目的是改善该目录的实用性。

## A.4. 安全

100. 继续在世界各地的核电厂进行安全改进。这种改进包括确定和适用从福岛第一核电站事故汲取的教训、提高纵深防御的有效性、加强应急准备和响应能力、维持和加强能力建设以及保护人类和环境免于电离辐射。在 2014 年 3 月 24 日至 4 月 4 日在维也纳举行的《核安全公约》缔约方第六次审议会议期间，还审查了成员国鉴于该事故所采取的行动。

101. 执行原子能机构“核安全行动计划”仍然是成员国、秘书处和其他有关利益相关方为加强核安全框架所采取行动的核心。原子能机构继续通过分析相关技术问题共享和传播从福岛第一核电站事故中汲取的教训。它组织了福岛第一核电站事故后的辐射防护问题国际专家会议（2 月 17 日至 21 日）和严重事故管理问题国际专家会议（3 月 17 日至 20 日）。此外，原子能机构还举行了“技术和科学支持组织在加强核安全和核安保方面面临的挑战国际会议”（10 月 27 日至 31 日）。2014 年出版了《国际原子能机构关于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的报告》<sup>12</sup> 和《国际原子能机构关于“福岛第一核电站事故后的辐射防护：促进信任和理解”的报告》<sup>13</sup>。

102. 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-13 显示了每运行 7000 小时（约一年）的非计划手动和自动紧急停堆或关闭次数。紧急停堆只是一种安全实绩指标，但该方法通常用来表示成功地通过减少需反应堆紧急停堆的不良和非计划热工水力和反应性瞬变次数提高了电厂的安全性。如图所示，安全性继续稳步提高，尽管 2013 年出现了某种轻微上升的趋势。

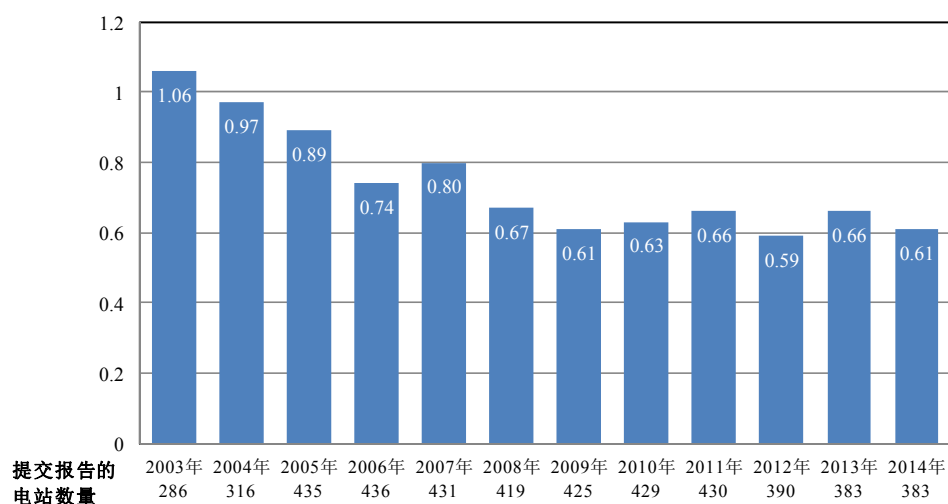


图 A-13. 平均紧急停堆率：自动和手动紧急停堆年平均数。（资料来源：原子能机构动力堆信息系统 <http://www.iaea.org/pris>）

103. 有关核安全的更多资料可在《2015 年核安全评论》中找到。

<sup>12</sup> <http://www.iaea.org/sites/default/files/humanfactors0914.pdf>

<sup>13</sup> <http://www.iaea.org/sites/default/files/radprotection0914.pdf>



## B. 原子数据和核数据

104. 世界四大核心核数据中心不断更新的文件是所有核科学和技术动力应用和非动力应用的基础。这些中心是原子能机构核数据科、美国布鲁克海文国家实验室国家核数据中心、经合组织核能机构数据库和俄罗斯奥布宁斯克核数据中心。核数据科协调连接这些中心与其他专业中心的两个网络：主要涉及“实验核反应数据”数据库的“国际核反应数据中心网”；监督“编评核结构数据文件”的“核结构和核衰变数据评价者国际网”。

105. 核数据工作的协作性质由经合组织核能机构成立的国际核数据评价合作工作组做了说明。25 年来，国际核数据评价合作工作组采用小组办法解决诸如国际合作编评数据库组织等的具体问题。国际合作编评数据库组织项目汇集国际核反应数据界专家，识别和记录现有编评数据库、测量数据和模型计算解释之间的差异，旨在调和这些差异方面取得进展，以便对所有应用提出更准确的评价。最初重点是少量最高优先级的原子核，即氢、氧、铁和主要铜系元素。国际核数据评价合作工作组另一个小组正在处理一项关于采取可扩展标识语言的新的现代结构化数据格式的建议。

106. 国际协作的另一个领域是实验设施。欧洲核研究组织中子飞行时间设施的脉冲中子源测量了恒星核合成、复合原子核中对称破缺效应、核液位密度调查以及核废物嬗变、加速器驱动系统和核燃料循环调查等核技术应用（图 B-1）所需宽泛能量范围的许多截面。一个欧洲国家联合体已开工建设欧洲最大的有源基础设施项目之一，欧洲散裂中子源。2014 年 10 月在瑞典隆德举行了欧洲散裂中子源的奠基仪式，预计将在 2019 年产生第一批中子。

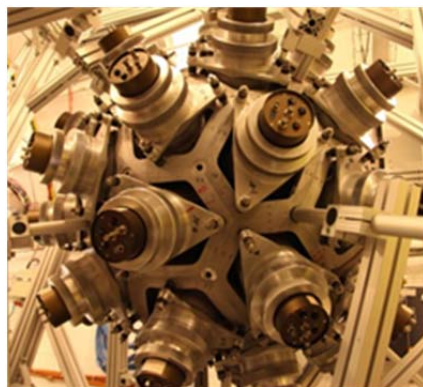


图 B-1. 欧洲核研究组织中子飞行时间设施的探测器。（照片由欧洲核研究组织提供）

107. 放射性束流设施使测量在常规设施中无法研究的许多核素成为可能。核物理学中若干处于稳定性极限的研究领域可以利用这类束流进行调查，包括研究  $r$ -和  $rp$ -过程产生的原子核、幻数附近的壳层闭合以及调查非常重的元素。在法国国家大型重离子加速器研究中心正在建造的“螺旋-2”号设施将使众多国际科研工作者能够获得放射性束流；第一次实验计划于 2015 年进行。

108. 2013 年在美国纽约举行的《核数据用于科学技术国际会议文集》于 2014 年发表在一本经同行评审的期刊（“核数据表” 118—120）中。这次三年一次的会议展示了数百名为许多应用生成或使用核数据的科学家和工程师的工作。

109. 严重依赖核数据的应用包括核裂变反应堆，即国际合作编评数据库组织项目的重点；聚变研究，特别是在国际热核实验堆下的聚变研究；医疗需求，特别是同位素生产；以及剂量测定，其中中子谱的性质可使用各种非常良好表征的反应截面来测量。

110. 原子数据通常被视为一个单独的工作领域，但其中的原子数据和核数据交互广泛一个专题是核瞬间。实验原子精细结构谱与精确的原子结构计算结合，可提供对核结构参数的调查，包括电荷半径、磁偶极矩和静电四极矩。一般用于类氦重离子的详细量子电动力学计算，现在使得能够分离对超精细结构的场理论效应和玻尔-韦斯科普夫效应。这种性质的多个应用在 2014 年 9 月 21 日至 25 日于德国耶拿举行的“第九届国际原子数据和分子数据及其应用会议”上进行了描述。

111. 不确定性量化科学在复杂的系统如天气和气候的模拟应用中迅速扩大。2013 年和 2014 年召开了几次会议，讨论了不确定性量化在计算的原子数据和分子数据方面的新兴应用，正如在实验方面所做的那样。该应用涉及准确计算极具挑战性的简单物理系统，它在一定程度上代表着不确定性量化科学的一个新的分支。



图 B-2. 欧洲 X 射线自由电子激光装置位于德国汉堡。（照片由欧洲 X 射线自由电子激光装置项目提供）

112. 新的软硬 X 射线自由电子激光装置用户设施正在世界各地投入使用。两个硬 X 射线自由电子激光装置设施正在运行：美国斯坦福直线加速器相干光源于 2009 年投入运行，日本播磨 SPring-8 埃袖针自由电子激光设施于 2011 年投入运行。大韩民国浦项加速器实验室的硬 X 射线设施 PAL-XFEL、德国汉堡的欧洲 X 射线自由电子激光装置（图 B-2）和瑞士菲利普根的 SwissFEL 正在建设中。前两座设施预计 2016 年将生产第一束激光。这些设施和世界各地的其他自由电子激光装置的状况在 2014 年 8 月于瑞士巴塞尔举行的“第 36 届国际自由电子激光装置会议”上进行了评述。这些 X 射线自由电子激光装置用于研究原子、分子和材料的电子特性，包括对复杂生物分子如脱氧核糖核酸中的快速过程的研究。

## C. 加速器和研究堆的应用

### C.1. 加速器

113. 2014 年，两个雄心勃勃的大型加速器项目开工，均计划于 2020 年至 2022 年投入运行。位于法国格勒诺布尔的欧洲同步加速器辐射设施已经开始其目前基于加速器光子源的升级。新的源被认为是同类型的第四代，相比现有的源将更亮（性能增强 100 万倍），同时减少能耗 20%。其目的是为物理学、化学、材料科学和生物学等广泛学科的研究人员提供各种能力。欧洲散裂中子源粒子加速器已开始施工，将为世界科学研究提供最强烈的脉冲中子束。欧洲散裂中子源将是一个以加速器为基础、利用中子散射开展材料科学研究的设施。它将提供比任何当前中子源亮度高达 30 倍的中子束。它位于瑞典隆德，在 MAX IV 实验室附近。该粒子加速器将在材料科学研究方面与欧洲散裂中子源相互补充。

114. 同步加速器设施是技术发展的重要研究工具和重要推动者。同步加速器设施的束时间通常超额认购 2—3 倍，也就是说，所有研究建议只有三分之一到一半能获得批准并实现。尤其是在现代束线，例如自由电子激光装置，这一因子甚至更高，大约为 5 倍。这使得刚刚踏入该领域的发展中成员国的研究团体即使有可能，也是很难在同步加速器获得束时间。

115. 为解决这一状况，并使任何成员国的研究团体能够利用最先进的同步加速器设施，原子能机构已在意大利的里雅斯特的 Elettra 设施建立一个多技术实验设施，作为 X 射线荧光束线终端站（图 C-1）。该项目是与德国联邦物理学和技术研究所和柏林技术大学合作实施的。

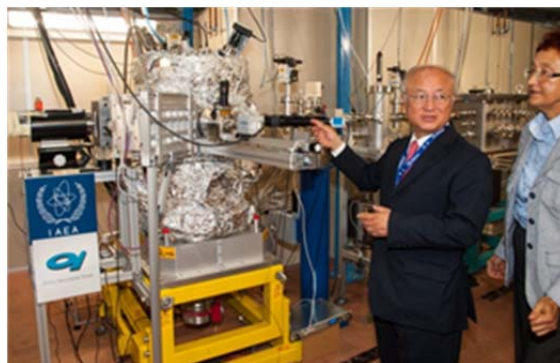


图 C-1. 2014 年 10 月 6 日在新的 X 射线荧光束线开放期间原子能机构总干事天野之弥与 Elettra 设施超高真空室研究协调员 Maya Kiskinova 在一起。（照片由 Elettra 设施提供）

116. 原子能机构超高真空室束线终端站允许不同的 X 射线荧光和光谱测定方法协同应用，从而提供对材料的完整元素、化学和结构表征。超高真空室配备一个先进七轴电动样品操纵器，用于移动/转动将调查的样品，并配备若干相对同步加速器束不同方位



的 X 射线探测器。X 射线荧光束线的最佳特性包括扩展的能量可调谐性（2—14 千电子伏）、通量（在 5.5 千电子伏、2.4 吉电子伏机器模式下每秒 5109 个光子）、 $1.5 \times 10^{-4}$  分辨能力、小光束发散角（0.15 毫弧度）和出口狭缝的光束尺寸等于 220 微米 x 90 微米。

117. 2014 年，原子能机构还推出了“加速器知识门户”<sup>14</sup> 新的网站，目的是汇集加速器界，并为处理人类和科研基础设施问题的决策者、科学研究理事会和政府组织提供参考。该门户网站包括世界范围内 196 个在运中低能量粒子加速器设施的数据库。为了成为一个有吸引力的科学协作和网络建设平台，它收集有关软件和数据库、科学和教育文件、基于加速器研究的最新亮点、会议、讲习班和短训班通知的各种链接，并允许注册用户上传自己的文稿。

118. 加速器设施的管理包括不同于其他研究设施的若干挑战。由于加速器往往既是研究的工具又是研究的对象，因此，这些方面可能很容易被忽视。为协助成员国高效应对当前的经济和技术挑战，原子能机构于 2014 年 9 月 15—19 日在法国圣欧班与 SOLEIL 同步加速器设施合作，组织了一次“加速器设施管理战略技术会议”。

119. 能够以纳米精度注入离子的单离子源最近成为若干研究领域和新技术可能发展的驱动力。作为原子能机构有关半导体和绝缘体辐射感生缺陷的协调研究项目的一部分，单离子照射被用于评价电荷感生缺陷在辐射损伤电子器件中的输运性质。由单离子感生的电流瞬变反映了材料性能以及装置结构，同时也取决于离子类型。单离子也可以在离子进入材料时沿离子轨道修改材料的电学、光学和结构性质。确定性单离子照射/注入是一项具有挑战性但重要的技术，能够打开精确位置控制材料改性的大门。

120. 图 C-2 中的两个图像示出这种改性材料的例子。左图像显示的是可以把特征尺寸的硅微加工缩小到几十纳米的过程，从而可以制造一系列新的纳米级结构，用于诸如微/纳米流体和纳米压印平版印刷等领域<sup>15</sup>。右图像显示的是单离子注入如何可用于钻石缺陷工程以形成氮空位中心，预计氮空位中心将在量子计算、极高分辨率磁传感器或纳米级光子学方面具有广阔的应用前景<sup>16</sup>。因为材料性质可以沿离子轨道进行修改，所以采用纳米级位置控制的单离子照射技术是一项用于修改材料的电学、光学和结构性质的关键技术。

---

<sup>14</sup> 该加速器知识门户可在 <http://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/default.aspx> 找到。

<sup>15</sup> AZIMI, S. 等，“利用硅模板掩模进行 LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> 金属丝制品的纳米级平版印刷”，《纳米技术》第 25 期（2014 年）445301。

<sup>16</sup> Takashi Yamamoto 等，“通过分子氮注入实现强耦合钻石自旋量子比特”，《物理评论》B 88, 201201(R)（2013 年）。

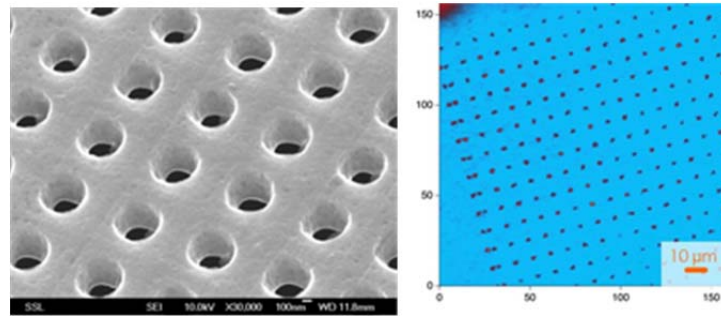


图 C-2. 左图：硅中直径为几百纳米的均匀孔阵列扫描电子显微镜图像。（照片由新加坡国立大学 M.B.H. Breese 提供）。右图：由钻石离子注入形成的氮空位中心栅格共聚焦显微图像。将一些氮-15 离子照射到每个照射点。（照片由日本原子能委员会 T. Ohshima 提供）

121. 除了基础研究和应用研究，粒子加速器是工业应用中非常重要的工具。能够提供几微安到 100 毫安的高度稳定和准直的离子束电流和 100 电子伏到约 10 兆电子伏的入射离子能量的加速器技术发展，为制造用于逻辑、存储和模拟操作的集成电路以及日益多样化的光学传感器和成像器件提供了广泛的能力技术。离子注入目前被广泛用于半导体行业，以制造和修改电子材料和光子材料<sup>17</sup>。目前，科学家估计，全球范围内有超过 1.7 万台加速器在研究机构、医院和工业领域运行<sup>18</sup>。

## C.2. 研究堆

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

---

<sup>17</sup> FELCH, S.B 等：“离子注入用于半导体装置：工业加速器的最大使用”，2013 年美国加利福尼亚州帕萨迪纳《太平洋认证合作组织会议文集》，第 740 页，  
<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/pac2013/papers/weyb2.pdf>。

<sup>18</sup> “工业加速器及其应用”，Robert W Hamm 和 Marianne E. Hamm；世界科技出版公司，2012 年。

表 C-1. 世界各地研究堆的常见应用<sup>19</sup>

应用类型 <sup>a</sup>	所涉研究堆数量 <sup>b</sup>	拥有被利用设施的成员国
教学/培训	178	55
中子活化分析	129	53
放射性同位素生产	100	44
材料/燃料辐照	85	30
中子照相	74	41
中子散射	53	35
嬗变（硅掺杂）	31	20
地质年代学	26	22
嬗变（半宝石）	22	13
中子治疗，主要是研发	19	13
其他 <sup>c</sup>	141	38

<sup>a</sup> 最近的原子能机构出版物《研究堆的应用》（原子能机构《核能丛书》第 NP-T-5.3 号，2014 年）更详细地描述了这些应用。

<sup>b</sup> 来自所考虑的 284 座研究堆（247 座在运，19 座临时关闭，6 座在建、12 座列入计划；2014 年 12 月 31 日）。

<sup>c</sup> 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。

123. 根据原子能机构“研究堆数据库”，迄今已建成 747 座研究反应堆，截至 2014 年 12 月 31 日，其中 247 座正在运行。俄罗斯联邦拥有数量最多的运行研究堆（包括临界设施）（49 座），其次是美国（41 座）、中国（15 座）和法国（12 座）。许多发展中国家也有研究堆（如非洲有八座设施在运行）。在世界范围内，57 座研究堆以超过 5 兆瓦的功率水平运行，从而为支持高容量应用提供高中子通量。

124. 大多数在运的研究堆仍利用率严重不足，并且平均已运行 45 年以上。因此，其中许多需要进行老化管理、现代化和整修方面的持续关注。对战略利用和业务规划的兴趣持续增加，以提高利用和获得额外收入。在过去的两年中，37 座研究堆设施编写了战略计划并提交原子能机构审查。原子能机构于 2014 年 10 月组织了一次后续行动讲习班，以传播吸取的经验教训，并作为这一审查过程的结果在成员国中分享良好实践。国际协作继续促进和加强研究堆用于教育和培训目的。一个例子是在拉丁美洲和欧洲的因特网反应堆实验室项目，其目的是实现各大学与专用于教育和培训的在运研究堆的互连互通。

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



图 C-3. 阿根廷核监管局已向 RA-10 研究堆颁发了建造许可证，该研究堆将用于增加该国用于材料/燃料试验、硅掺杂以及研究和发展的放射性同位素生产。（图片由国家原子能委员会提供）

125. 若干国家作为发展核科学和技术基础设施和计划包括核电的国家重点设施，正处于建设新研究堆的不同阶段。新的研究堆建设正在阿根廷（图 C-3）、法国、约旦、大韩民国、俄罗斯联邦和沙特阿拉伯进行。若干成员国拥有建造新的研究堆的正式计划，包括比利时、巴西、印度、荷兰、美国和越南。阿塞拜疆、孟加拉国、白俄罗斯、玻利维亚、科威特、蒙古、尼日利亚、南非、苏丹、泰国、突尼斯和坦桑尼亚联合共和国等其他国家正在考虑建设新的研究堆<sup>20</sup>。

126. 因为老旧反应堆退役和被几个国家共享的研究堆所取代，预计国家运行的研究堆数量将继续减少。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。在这方面，由原子能机构推动的<sup>21</sup>研究堆地区网络或联盟帮助促进国际合作，并使研究堆能够扩大其利益相关者和用户群体。此外，2014年原子能机构还启动了一个新的协作机制，即由原子能机构指定的以研究堆为基础的国际中心。

127. 美国发起的“减少全球威胁倡议”在2014年全年继续履行使命，以最大程度减少高浓铀在民用核部门的使用。到2014年底，在实施“减少全球威胁倡议”范围内的200座研究堆中，有92座已经转换为使用低浓铀燃料或确认已关闭，其中包括一座使用高浓铀的钼-99生产设施。主要成就包括俄罗斯联邦在7月首次达临界的ARGUS反应堆准备和装载低浓铀燃料堆芯和乌兹别克斯坦从已关闭的FOTON反应堆卸出液体高浓铀燃料。2014年期间，中国、加纳和原子能机构签署了一项协议，支持通过供应低浓铀燃料对加纳GHARR-1研究堆进行燃料使用转换。为实施转换和返还高浓铀明确了技术先决条件和采取了行动计划。

128. 最低程度使用高浓铀的活动包括将高浓铀研究堆燃料返还进行铀浓缩的原产国。到2014年底，美国原产的高浓铀燃料的返还计划已完成了其目标的76%，移出了近

---

<sup>20</sup> 原子能机构出版物《研究堆项目的具体考虑因素和里程碑》（原子能机构《核能丛书》第 NP-T-5.1 号）旨在对成员国在这方面起到帮助作用。

<sup>21</sup> 原子能机构已在波罗的海、加勒比地区、中非、中亚、东欧、地中海地区以及独立国家联合体组建了几个不同的研究堆联盟。



1300 千克高浓铀研究堆新燃料和乏燃料。原产俄罗斯的高浓铀返还计划完成了 86%，移出了近 2160 千克高浓铀研究堆新燃料和乏燃料。在波兰玛利亚研究堆转换为使用低浓铀燃料后，53 千克高浓铀乏燃料于 9 月被运回俄罗斯联邦。在哈萨克斯坦，从 Alatau 的 WWR-K 设施（正在进行高浓铀向低浓铀的燃料转换）卸出的 10.2 千克高浓铀新燃料和 37.3 千克高浓铀乏燃料被运回俄罗斯联邦（图 C-4）。



图 C-4. TK-S16 运输容器上的原子能机构保障封记（左图）。专为从哈萨克斯坦阿拉木图至俄罗斯联邦运输准备的运输容器（右图）。

129. 在转换为低浓铀并返还高浓铀燃料后，常常要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 型研究堆的全面现代化计划提供资金。

130. 高通量、高性能研究堆的转换需要有目前正在开发的先进甚高密度铀-钼燃料。虽然在该领域取得了实质性进展，但还需要特别是为辐照和辐照后检验计划以及在制造技术领域进行进一步的努力和试验，以实现以商业方式提供合格的低浓铀燃料。11 月，俄罗斯联邦 TVEL 燃料公司签署了一项开始向荷兰高通量堆供应低浓铀燃料的合同。

131. 虽然 2014 年期间没有出现重大的钼-99 供应短缺，但加工设施和老旧研究堆的运行挑战依然如故。由于需求变化、效率提高以及一定程度的供应多元化，少量的短缺并没有造成 2007 年至 2010 年间所见规模的危机。医用同位素生产工艺继续从高浓铀向低浓铀转换，澳大利亚核科学和技术组织和南非 NTP 放射性同位素公司继续成为非高浓铀钼-99 的主要供应商。2014 年，澳大利亚核科学和技术组织开始动工兴建其新的钼-99 生产设施，预计该设施将使每周基于低浓铀的钼-99 产量从六天 1000 居里增加到 3000 居里。南非 NTP 放射性同位素公司继续将其工艺转化为专门使用低浓铀。其他两个主要医用同位素生产商，即比利时放射性元素研究所和荷兰 Mallinckrodt 公司，已经开始努力支持其商业规模生产工艺从高浓铀向低浓铀转换。

## D. 核技术用于改善动物健康

132. 核和核相关技术正在动物健康领域特别是疾病诊断和病原微生物表征方面发挥重要作用。这项审查侧重于包括非同位素方法和同位素方法在内的核技术如何和在哪些方面在过去产生了影响，以及预期这些技术今后将在哪些方面产生影响。

### D.1. 利用辐照疫苗保护牲畜免于跨境动物疾病

133. 疫苗是保护动物和人类免于威胁生命的疾病之不可或缺的工具。大多数疫苗都依靠某种形式的病原体衰减或失活，这些衰减或失活使用的化学或物理方法，同时，在这两种情况中都维持免疫原性并因此诱发保护性免疫反应。一般而言，致弱活疫苗比灭活疫苗诱发更好和更强的保护，因为灭活过程会破坏一些对诱发良好免疫非常重要的蛋白质。

134. 替代疫苗开发所用的化学或物理处理的一个方法是辐照。可以以逐渐破坏或削弱病原体基因组核酸同时保持其抗原性并从而触发更好的宿主免疫反应的方式实施辐照。辐照疫苗开发方面的最新进步证明，获得具有代谢活性而不具有复制性、能够引起与暴露于活病原体相同的免疫反应的微生物是可能的。将冷却或冷冻的活病原体纯化培养液置于辐照器中，并按照规定了特定时间间隔和能量水平的程序进行照射。例如，对于锥虫病有机体，使用的辐照水平为 ~100 戈瑞。随后，在冷冻干燥过程中，将辐照病原体溶液与冷冻保护剂相混合，对溶液进行稳定，然后将其用作候选疫苗<sup>22</sup>。

---

<sup>22</sup> Duxbury RE、Anderson JS、Wellde BT、Sadun EH、Muriithi IE (1972 年)。“刚果锥虫病：利用  $\gamma$  辐照寄生虫对鼠、狗和牛进行免疫接种”。《实验寄生虫学》杂志，第 32 卷，第 527—533 页。

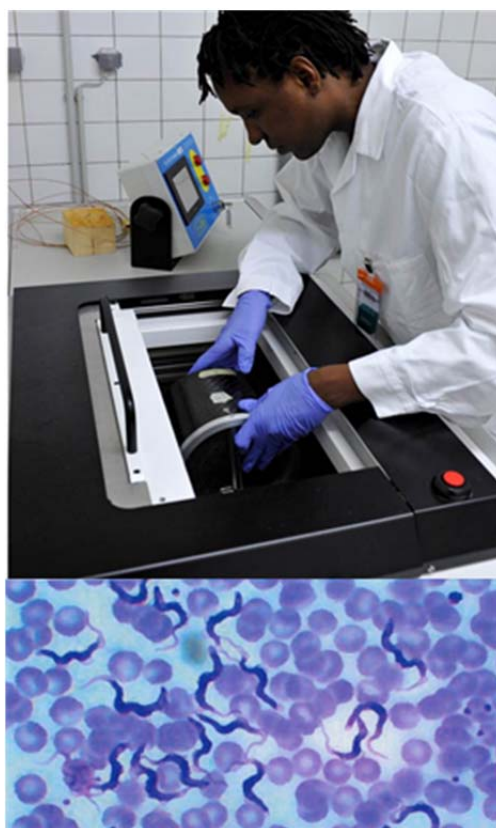


图 D-1. 使用 X 射线源对离体锥虫培养液（伊氏锥虫）进行辐照。

135. 钴-60 源被普遍用于病原体辐照；但也可使用 X 射线和电子束。剂量因病原体而异。研究表明，分别经 600 戈瑞和 700 戈瑞照射而衰减的寄生虫捻转血矛线虫和蛇形毛圆线虫的第三阶段幼虫保护绵羊未受这些寄生虫感染<sup>23</sup>。肺蠕虫胎生网尾线虫需要较低的剂量（400 戈瑞），否则，这种吸虫就不能迁移到肺中开始诱发保护性免疫<sup>24</sup>。布鲁氏菌等细菌可用 3000 戈瑞衰减<sup>25</sup>，巴氏杆菌等细菌可用 6000 戈瑞衰减<sup>26</sup>，炭疽杆菌等细菌可用 20 000 戈瑞衰减<sup>27</sup>。病毒则需要更高的剂量来影响其蛋白质和结

<sup>23</sup> Sivanathan S、Duncan JL、Urquhart GM（1984 年），“影响使用辐照捻转血矛线虫幼虫对绵羊进行免疫接种的一些因素”，《实验寄生虫学》杂志，第 16 卷，第 313—323 页。

<sup>24</sup> Winter MD、Wright C、Lee DL（2000 年），“使用  $\gamma$  辐照幼虫对年轻羔羊进行防止有棘细颈线虫感染的疫苗接种”，《寄生虫学国际》杂志，第 30 卷，第 1173—1176 页。

<sup>25</sup> Dabral N、Martha-Moreno-Lafont、Sriranganathan N、Vemulapalli R（2014 年），“使用  $\gamma$  辐照木鼠布鲁氏菌对小鼠进行口服免疫可诱发防止在腹腔内和鼻内与剧毒流产布鲁氏菌 2308 接触的保护”，《PLoS One》杂志第 9 期第 (9) 卷：e107180. doi:10.1371/journal.pone.0107180。

<sup>26</sup> Dauphin LA、Newton BR、Rasmussen MV、Meyer RF、Bowen MD（2008 年），“ $\gamma$  辐照可用于灭活炭疽杆菌孢子而不损害诊断检测的灵敏度”，《应用与环境微生物学》，第 74 期，第 4427—4433 页。

<sup>27</sup> Aloni-Grinstein R、Gat O、Altboum Z、Velan B、Cohen S、Shafferman A（2005 年），“基于表达重组突变体保护性抗原的活衰减非产毒炭疽杆菌的口服孢子疫苗”，《感染和免疫》杂志，第 4043—4053 页。

构。口蹄疫病毒需要用 40 000 戈瑞灭活<sup>28</sup>，蓝舌病病毒需要用 60 000 至 100 000 戈瑞灭活<sup>29</sup>。

## D.2. 核技术用于跨境动物疾病和人畜共患疾病的早期和快速诊断

136. 早期、快速诊断对控制跨境疾病至关重要。对宿主样品（血液、血清、组织和分泌物）上进行诊断试验，以检测病原体或抗体。放射性标记对改进确定病原体或其抗原或抗体（暴露于病原体抗原引起的蛋白质）的疾病诊断测试非常重要。

137. 以前，为了检测样品中的疾病，免疫分析使用放射性标记脱氧核糖核酸或特定病原体的蛋白质作为引发免疫反应的抗原。这些分析主要在合格实验室进行，但随着酶和荧光染料取代同位素标记，这些试验被广泛推广到现场。酶和荧光染料的使用虽然切实可行，但从未达到使用放射性同位素所观察到的高度特异性和灵敏度。在需要高度灵敏度和特异性时（如诊断 H5N1 禽流感、口蹄疫、裂谷热或非洲猪瘟），同位素标记是始终可靠的早期和快速诊断技术。原子能机构引领了有质量保证和价格适宜的用于诊断若干传染和寄生疾病如口蹄疫、牛布氏杆菌病、牛瘟和锥虫病的分析技术的开发。



图 D-2. 许多国家疾病诊断实验室中经过培训的人员已在其本国利用核和分子技术来防治动物疾病和人畜共患疾病。

138. 随着核酸放大平台技术（如聚合酶链反应）的出现，传染性疾病的诊断实现了显著改进。这使得能够对特别是高度传染性病原体或难以分离和离体生长的病原体进行早期、快速和确定性诊断。进行核酸检测时，首先使用跟踪剂如硫-35、硫-35 蛋氨酸、磷-35 和磷-32 进行脱氧核糖核酸/核糖核酸标记。主要优势是能够检测到动物体内极低水平的感染（例如，用帕莱斯血矛线虫、奥氏奥斯特他线虫、肿孔古柏线虫和辐射

---

<sup>28</sup> Motamedi Sedeh F、Khorasani A、Shafae K、Fatolahi H、Arbabi K（2008 年），“使用  $\gamma$  辐照制备 FMD 型 A87/IRN 灭活疫苗和豚鼠的免疫反应”，《印度微生物学》杂志，第 48 卷，第 326—330 页。

<sup>29</sup> Campbell CH（1985 年），“ $\gamma$  辐照灭活的蓝舌病病毒的免疫原性”，《疫苗》杂志，第 3 卷，第 401 页。



结节线虫制备的脱氧核糖核酸探针能够检测到受感染山羊、绵羊和牛粪便样品中至少 25 个的卵)<sup>30</sup>。这使得能够在发病前就检测到病原体。

139. 源于核的技术正在防治当前西非埃博拉病毒病爆发方面发挥作用。原子能机构已发起实施了一个有三个组成部分的项目，目的是向能力建设、预防和早期检测以及改进现有诊断工具提供支持。第一个组成部分包括向现场已设立的诊断小组提供技术、设备和试剂/耗材支持。第二个组成部分将以埃博拉病毒病的人畜共患性质为目标和监测动物（野生动物）与人类的接触，以防止或能够及早检测到病毒从野生动物载体向人类群体的入侵。第三个组成部分将面向在兽医和（或）公共卫生部门属下运行的官方诊断实验室网络。这将需要因地制宜地实施或改进现有诊断工具，以确保对埃博拉病毒病进行有质量保证的早期、快速、灵敏和特异性检测和跟踪。该一揽子综合项目将有助于处于危险中的国家管理持续发生中的埃博拉病毒病爆发，以及在今后出现任何埃博拉病毒病威胁时快速作出响应。

### D.3. 利用核技术跟踪和监测跨境动物疾病和人畜共患疾病

140. 在动物及其产品的流动司空见惯和气候变化所致环境变化可能潜在影响传染病及其病媒传播的世界上，迫切需要拥有能够确定这些疾病的地理来源和在必要时提供有关摄食习惯及其相关病媒迁移情况的信息的技术。可以利用稳定同位素分析技术为认识疾病流行病学提供工具。稳定同位素是天然存在的并且不发生放射性衰变的元素形态。共存在 250 多种稳定同位素；但只有一部分参与重要的生物和生态过程。同位素使用质谱测定法按相对于国际标准的同位素差测定，并按千分比以  $\delta$  单位比率报告。稳定同位素分析值以环境中某些同位素的水平和动物组织中同一些同位素的浓度之间的密切相关性为基础。

141. 动物组织中的氢 ( $\delta^2\text{H}$ ) 和氧 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) 比率被用于研究动物迁移，因为这些比率精确地反映了动物在不同摄食生境如湖泊、河流、海洋和地下水之间的迁移。利用稳定同位素表征一个种群涉及检查对整个种群具有代表性的一些个体的同位素特征。几年来，已在利用稳定同位素使用代谢活性组织（血液和肌肉）中的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  值表征和区分动物种群（特别是鸟类）方面取得进展，但目前最有效的示踪剂似乎是在代谢惰性、季节性生长的组织如羽毛、喙和爪子中发现的氢同位素。羽毛一直将此信息保留到它们被替换或通常每年一次的换羽。相反，爪子不断增长，理论上可以提供时间积分曲线图，这取决于视爪增长率。特定鸟类种群的同位素特征一旦已知，该种群的任何个体均可提供关于该种群全球迁徙情况的信息。

---

<sup>30</sup> Höglund J, Engström A, von Samson-Himmelstjerna G, Demeler J, Tydén E (2013 年), “使用牛粪便中的奥氏奥斯特他线虫和肿孔古柏线虫进行实时聚合酶链式反应检测，以量化感染水平”。《兽医寄生虫学》，第 197 卷，第 251—257 页。



图 D-3. 稳定同位素分析正有助于确定候鸟在跨洲传播禽流感病毒方面的作用。



图 D-4. 使用眼药水对鸡进行疫苗接种。

## E. 医用辐射剂量学领域的进步

142. 医用电离辐射的利用已十分成熟。在辐射治疗中，利用辐射杀死恶性细胞，使辐射剂量作用于靶体积而成为治疗患者的手段。在医学成像中，利用辐射产生诊断图像，只是对患者施用的任何剂量难免产生副作用。虽然辐射治疗和诊断的基本原则和目标显著不同，但在所有病例中，了解辐射剂量情况对核实治疗系按处方实施或估计与在医学成像程序过程中受到辐射照射的患者有关的危险都非常重要。

### E.1. 医学成像

#### E.1.1. 诊断放射学中患者剂量测定

143. 联合国原子辐射效应科学委员会强调指出，医疗照射特别是诊断放射学是迄今最

大的人工电离辐射照射来源，而且正在继续大幅度地增加<sup>31</sup>。主要原因是进行了大量X射线检查，以及有时不适当地采用了计算机断层照相等复杂的高剂量技术。

144. 因此，有必要监测和控制患者剂量，并优化X射线成像系统的设计和性能。患者剂量测定是专业从事诊断放射学的医用物理学家的主要责任，并已在许多国家被纳入国家立法和管理条例。诊断放射学剂量学测量对于指导水平的制订和使用、设备性能评定和相对危险评定都是必需的。

145. 诊断用X射线成像被用于从简单的投影放射照相到先进的截面动态成像的广泛检查类型。这导致开发了广泛的剂量学量值、测量仪器和技术，它们都给在临床环境中工作的人员提出了挑战。

146. 一般而言，用于诊断放射学剂量测定的量值可分为两大类：

- (1) 特定应用量值，系能够直接测量并且可以根据特定情况或模式定制的实际剂量测量量值。这些量值包括入射空气比释动能、空气比释动能-面积乘积（主要用于投影成像）和用于截面成像的计算机断层照相法空气比释动能指数（图E-1）。
- (2) 危险相关量值，系能够用于估算辐射危害或危险并因此为吸收剂量量度的量值。这些量值不能被直接测量，而只能通过特定应用量值计算或经由适当模型计算导出。



图 E-1. 标准聚甲基丙烯酸甲酯人体仿真模型中和空气中计算机断层照相法剂量测量。

147. 取决于诊断模式和所需的剂量测量类型，可使用若干类型的剂量计，条件是它们具有适当的敏感度和能量响应，但一般使用几立方厘米体积的电离室或专门为这类测量设计的固态探测器。作诊断放射学中频繁使用的其他类型剂量计是胶片（射线照相胶片或辐射变色薄膜）、热释光剂量计和光激发光剂量计。

148. 原子能机构在该领域的工作一直侧重于进行供医院实施的患者标准统一和标准化。

---

<sup>31</sup> 联合国原子辐射效应科学委员会，辐射科学委 2008 年报告：电离辐射来源和效应，联合国，纽约，[http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008\\_1.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html)。

### E.1.2. 核医学中内照射剂量测定

149. 核医学的临床应用包括诊断成像和治疗处理。诊断核医学中的内照射剂量测定旨在测量健康器官接收的剂量，而在分子放射治疗中，则用作确定肿瘤和有危险器官所吸收剂量的手段。

150. 核医学诊断程序使得能够进行正常组织和病变组织的功能成像，最常见的应用是恶性组织定位和心肌灌注评定。对患者施用的放射性的量一般很低，成像程序的诊断好处远远大于有关危险。然而，应当针对每个患者进行组织剂量及其随机危险量化，而且应置于患者在多次成像期间接收的或由于其他诊断程序（如计算机断层照相、荧光透视）的结果而接收的累计值背景下。因此，所施用活度的量必须进行最优化，以便最大程度地提高图像的诊断质量，同时尽可能减少患者的风险。这对于儿科患者尤为重要，因为他们增强的器官辐射敏感度和任何随机效应可能因年数的增加而会显现。

151. 在治疗核医学中，使用放射性制剂治疗各种形式的癌症和其他疾病。虽然在外射束放射治疗中对靶器官或组织的辐射剂量有处方规定，并利用治疗规划系统对每个患者精确地计划处方剂量，但在治疗核医学中，并不适用这种个性化过程。反而，对患者施用的剂量由正在进行治疗的肿瘤的类型确定（例如对甲状腺癌施用 150 毫居里碘-131）。往往不进行治疗前评定，没有对靶组织和有危险器官接收的剂量进行最优化，从而在大多数情况下导致患者未得到充分治疗。这种情况的原因包括缺乏培训、资源和基于剂量处方施用于肿瘤的标准方法，以及没有关于肿瘤剂量-响应关系的数据。这种情况正在慢慢地发生改变，科学界越来越认识到因患者而异的剂量测定对于最佳疗效和患者安全乃至至关重要。

152. 在内照射剂量测定方面，组织吸收剂量（每单位组织质量所吸收的电离辐射能量）一般根据医学内辐射剂量法进行评定。这种方法要求对吸收放射性药物的每个源器官的累计活度（随时间发生的衰变的总数）进行计算。这种方法还要求基于国际上认可的基准解剖仿真模型分配“S 值”（每个源组织中每次衰变对靶组织造成的吸收剂量）（图 E-2）。

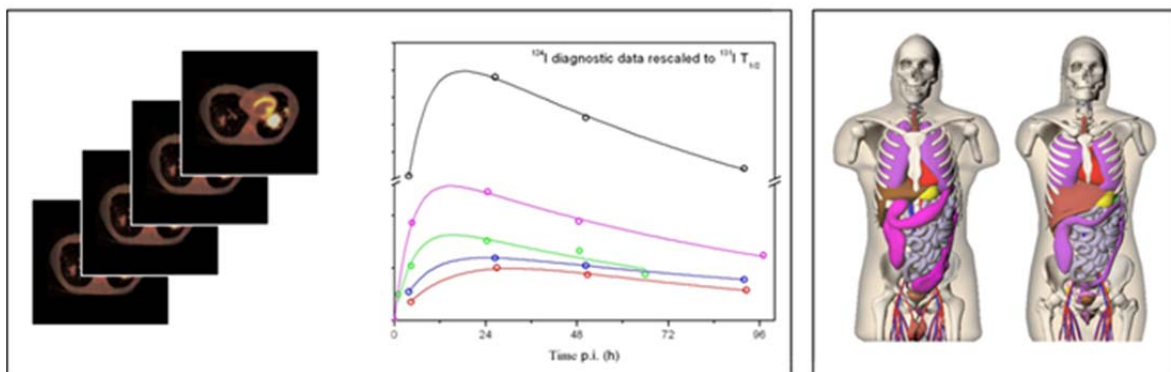


图 E-2. 左图：不同源器官的系列图像和推导时间-活度曲线。右图：用于 S 值计算的数学仿真模型。

## E.2. 辐射治疗

153. 放射治疗过程的一项关键要求是应当具有一致的参考剂量学标准和程序。在外射束剂量测定中，通过《外射束放射治疗中吸收剂量测定：基于水吸收剂量标准的国际剂量学实施法规》（《技术报告丛书》第 398 号，原子能机构，2000 年）等实施准则，在医用直线加速器和钴-60 机兆伏 X 射线剂量测定中普遍采用了水剂量标准。但是，最近在各种形式的立体定向放射治疗、立体定向全身放射治疗、立体定向放射外科和强度调制放射治疗等使用小射野的放射治疗技术方面有所增加。这些发展增加了临床剂量测定的不确定性，并对在这种射野应用针对《技术报告丛书》第 398 号等常规放射治疗的现有基准剂量测定方案的适当性提出疑问。在一些案例中，就因为使用了对大射野适合但不适用于小射野的方法和程序而发生了不幸事故。因此，目前正在制订对小射野剂量测定进行标准化的静态光子小射野剂量测定实施准则。

154. 自《技术报告丛书》第 398 号出版以来，已开发了用于放射治疗的质子和重离子束等许多不同的粒子束释放系统。这些系统使得改进肿瘤的治疗而又不增加对正常组织的损害成为可能。目前正在制订为这些射束的准确剂量测定提供支持的实施准则。

155. 经校准的井式电离室是校准用于近距离疗法的放射源的首选剂量计。但对于近距离疗法中还有相关建议的剂量测定仪器仪表中使用的所有源，没有国际上统一的质量保证/质量控制导则。许多诊所没有经校准的设备、内部冗余程序或接触独立比对活动的便利。结果是，使用各种方法来确定源强度。正在为制订水吸收剂量标准作出努力，以便与外射束放射治疗的剂量测定实施准则包括《技术报告丛书》第 398 号出版物实现统一。

## F. 放射性药物的发展

156. 核医学的进展取决于新型放射性核素高效生产方法的发展。在放射性同位素生产技术的发展方面已经取得了令人印象深刻的进展，最近对高能量和高电流回旋加速器的采用就证明了这一点。这已使得能够更广泛地获得包括镓-68、铜-64、锆-89 和锌-63 在内的若干新放射性核素，并促进了基于加速器的镓-99m 商业生产技术的发展，镓-99m 仍是最广泛使用的诊断用放射性核素。供医学应用的新放射性同位素的可得性也许能解决尚未预见的临床问题。这些进步正在给核医学领域带来巨大变化。

### F.1. 生产技术的进步

157. 最近在回旋加速器技术方面所作的技术改进正在提高主要医用放射性同位素的产量，从而使其能被广泛地用于临床。放射性药物医学应用的一个主要问题是确保作为这种诊断和治疗药剂主要组分的关键放射性同位素的供应不间断。如下所述，从多个不同放射性核素中获得的新放射性药物正展示对癌症的诊断和治疗而言大有希望的性能。但是，由于这些重要放射性同位素在利用低能量和低电流医用回旋加速器生产时



的产额很低，其可用性目前受到了限制。另一项挑战是提供了全世界钨-99m 供应的核反应堆的预期停堆，尽管它们仍然在诊断核成像方面发挥着基础性的作用。

158. 适用于医用放射性核素生产的回旋加速器技术现在已经成熟。商用回旋加速器可用的质子能量范围目前从 6 兆电子伏至 70 兆电子伏不等。随着可以高达 750—800 微安的质子电流的不断增加，已经取得了重要的进步。高电流克服了由于质子相互作用截面的低值所产生的放射性核素产额方面的限制。高电流的可用性促进了在能高效地散发由这种高电流产生的大量热能的固体靶装配技术方面的重要进步。有了这些新的技术成果，将有可能更大量地生产一些关键的放射性核素，如镓-68、锶-82、钨-99m 等，并确保它们的更广泛的供应。

159. 作为产生了最广泛使用的诊断用放射性核素钨-99m 的母体放射性核素，钼-99 供应的全球中断加速了寻找钨-99m 替代来源的工作。替代来源包括使用直线加速器和回旋加速器。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富集钼-100 的嬗变生产钼-99，而回旋加速器可用于通过辐照钼-100 直接生产钨-99m。这些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 的再循环效率在 90% 的范围内。

## **F.2. 新型放射性核素和放射性药物**

160. 本节介绍新发现的放射性药物对癌症诊断和治疗的应用前景。

### **F.2.1. 镓-68**

161. 在正电子发射断层照相法领域，放射性核素镓-68 的重要性特别由于其很容易通过锗-68/镓-68 发生器获得而正在不断增长。镓-68 是一种半衰期为 73 分钟的纯正电子发射体。在过去的几年中，几种基于促生长素抑制素的镓-68 放射性药物已在各种专著中作了描述，并已达到公认的适用于神经内分泌肿瘤的诊断试剂的地位。虽然这类神经内分泌肿瘤示踪剂仍是惟一临床上接受的镓-68 放射性药物的例子，但有大量的研究在进行其他类型癌症诊断用新试剂的开发工作。例如，最近就对一种用于前列腺肿瘤成像的示踪剂作了描述。该放射性药物的结构特别简单。它由一个与携有一种前列腺特异性膜抗原抑制剂的配体结合的镓-68 离子组成。这一新的前列腺特异性膜抗原靶向配体首先与放射性核素钨-99m 结合在一起进行研究，然后作进一步修改，以用于制备相应的镓-68 衍生物。在当前对前列腺癌患者正在进行以充分展示该新型放射性药物诊断效果和灵敏度的一些临床试验中得到了极有希望的结果。可得数据有力地表明，相比于作为通常用于前列腺肿瘤成像的常规示踪剂的氟-18 标记胆碱，这种新试剂可检测前列腺癌的复发和转移，且对比度有显著改善。

### **F.2.2. 铜-64**

162. 由于人类生物系统的复杂性，很难找到新的和有效的诊断和治疗用放射性药物。但有时会有出乎意料的发现，如有关铜-64 以其最简单的二价铜离子的化学形式被多种肿

瘤包括前列腺癌、黑色素瘤、乳腺癌和脑癌定量积累的发现。简单的铜-64 离子能选择性地靶向癌细胞，而不必被连接到某种生物媒介。

163. 铜是对一些金属酶的活性所必需的一种基本痕量元素。人体许多组织异常和疾病状态都与铜水平的降低或升高有关。血清铜水平在癌症患者体内是升高的，并与疾病的严重程度和对治疗的反应有关联。实验证据证明，生物可利用铜的水平调节着肿瘤生长，尽管仍不清楚铜离子调节不同癌症类型肿瘤发生的分子和细胞机理<sup>32</sup>。由于铜离子在癌细胞的复制中发挥的这种必要作用的结果，铜离子便累积在与遗传物质紧密接触的细胞核内，而在正常细胞中，它仍然存储在细胞质中。鉴于铜-64 的衰变通过同时发射半衰期为 12.7 小时的  $\beta^+$  粒子和  $\beta^-$  粒子的方式进行，因此可以通过利用其被肿瘤的强化吸收将其用作诊断和治疗用放射性核素。同一放射性核素的这种双重用途是“治疗诊断”概念的一个很好的例子<sup>33</sup>，在该概念中，治疗和诊断功能被合并到一个单一的试剂中。铜-64 可以很容易地使用传统的低能量医用回旋加速器通过对固体镍-64 靶进行质子辐照的方式生产出来。最近，铜-64 氯化盐的无菌水溶液已被批准作为制备铜-64 放射性药物的药物前体。在发现铜-64 意外选择性地靶向癌细胞之后，这种解决方案目前被用于各种临床试验，以评价铜-64 氯化物对于治疗不同肿瘤类型特别是黑色素瘤、乳腺癌和前列腺癌的诊断和治疗功效。

### F.2.3. 铯-89

164. 利用放射性标记抗体作为成像探针实现肿瘤可视化一直是一个有前途的分子成像领域。尤其是，利用放射性标记单克隆抗体的正电子发射断层照相法是一种有吸引力的非侵入性肿瘤检测和治疗规划方法。在常用的正电子发射断层照相法放射性核素中，只有几种适合于进行抗体标记，因为利用抗体的成像技术要求放射性同位素以良好的体内稳定性附着于单克隆抗体，而且其半衰期应当与单克隆抗体的药物动力学相匹配。目前，放射性同位素铯-89 正在吸引对抗体标记技术的大量关注，因为其 3.3 天的物理半衰期与实现完整单克隆抗体最优肿瘤-本底放射性活度比所需的时间（通常数天）相一致。

---

<sup>32</sup> Ishida S., Andreux P., Poitry-Yamatec C., Auwerx J., Hanahana D. (2013 年)“生物可利用铜调节氧化磷酸化和肿瘤生长”，《美利坚合众国国家科学院论文集》，第 110 卷，第 48 期，[www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1318431110](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1318431110)。

<sup>33</sup> 治疗诊断方法利用诊断试验确定患者是否可能从特定的治疗药物中受益。治疗诊断法目前令人兴奋之处源于其革命性的方法，即其允许根据疾病的具体分子特性改进治疗选择，从而开辟了客观地监测治疗反应的新途径。成像器采用的方法允许利用解剖的、生化的和功能病理学的各种表征手段达到非侵入性的生理学可视化。核医学数十年来一直实行这种形式的联合诊断-治疗程序，采用的就是最初将放射性碘用作可以说是最早的基于成像的分子治疗诊断剂的方法。利用  $\gamma$  发射体碘-123 进行成像和利用  $\beta$  发射体碘-131 的综合疗法已成为分化型甲状腺癌辅助疗法的基石。出现了采用对细胞增殖、类固醇合成、生长因子受体表达、儿茶酚胺生产、缺氧诱导的基因表达或细胞凋亡等生化过程具有选择性的放射性药物的配对分子成像-治疗技术的许多例子。综上所述，由于这种治疗诊断方法利用体内成像从而可能为更基本和更有效的疗法产生关于适当分子靶存在的有意义的药物动力学和生物学分布信息的内在能力，它可以为放射性核素医学应用的未来发展提供一个有吸引力的范式。

165. 锆-89 通过正电子发射和电子俘获方式衰变，其正电子发射的最大能量导致产生具有良好空间分辨率的正电子发射断层照相法图像。锆-89 可以在医用回旋加速器中通过以 14—14.5 兆电子伏能量的质子束轰击安装在铝/铜圆盘上的一种廉价天然钷箔的方式产生。

166. 迄今为止，各种单克隆抗体均以锆-89 进行标记，其中若干种已进入临床研究，并取得了有希望的结果。这其中包括用于人体表皮生长因子 2 型受体成像的曲妥单抗（赫赛汀）、用于表皮生长因子受体成像的西妥昔单抗、用于靶向血管内皮生长因子受体的贝伐单抗和用于监测前列腺特异性膜抗原受体的单克隆抗体 J591<sup>34</sup>。

#### F.2.4. $\alpha$ 发射体

167. 最近，一种药物级镭-223 氯化物溶液（拜尔公司生产的药物 Xofigo）成为首个被批准供转移性骨病治疗中临床应用的发射  $\alpha$  粒子的放射性药物。具有医疗相关性且目前可供潜在治疗应用的其它发射  $\alpha$  粒子的放射性核素有铍-211、铋-212、铋-213、钷-225、镭-223、铅-212、钷-227 和钷-149。这些放射性核素生产技术从核反应堆到回旋加速器和发生器系统不等。正在持续努力开发用于生产发射  $\alpha$  粒子的放射性核素的更简易和更高效的方法，以使它们广泛用于研究目的。 $\alpha$  粒子疗法研究的另一个重要方面是需要建立高效的化学程序，以便将该  $\alpha$  放射性核素拴接在所选定的载体分子上。事实上，与较轻的  $\beta$  粒子不同的是， $\alpha$  粒子大而重的特性可能对在溶液中所得到的放射性共轭的稳定性有较大影响，从而表明应采用稳健的化学方法才能达到令人满意的稳定性。

## G. 同位素用于气候和水文学研究最新发展和趋势

168. 水是可持续发展所需的一种关键资源，因为其可获得性影响着社会和经济活动的几乎所有部门。确保获得安全饮用水以及有充足的淡水供应用于卫生、粮食生产和能源生产是许多国家的一项持续挑战，影响着几十亿人的生活。但对淡水可获得性的差异却了解不足，对河流、湖泊和含水层中可用水总量及其贮存和流动情况的估计也不尽相同。预计气候变化将影响局地 and 地区水循环，这需要对不同时空尺度的可得资源作出更好的评定。采纳完善的政策以便根据不断变化的气候和已减少的人均水可获得量成功管理水供应，需要有可靠的水文资料。

169. 评定和管理水资源需要采取基于科学的多学科方案，而这建立在须以关于地表水和地下水产生、分布和流动的科学数据为坚实支撑的物理学和社会科学的基础上。天然存在的水的稳定同位素和放射性同位素及其溶解组分是跟踪水循环过程包括流入含水层、湖泊和河流的降雨与融雪的来源和路径以及这些水体之间的水文学相互作用的

---

<sup>34</sup> Zhang Y1, Hong H, Cai W. (2011 年)“基于锆-89 的正电子发射断层照相法示踪剂”。《当前放射性药物》，4 月第 4 卷（第 2 期）：第 131—139 页。



有力工具。水的同位素“指纹”有助于以快速和成本效益好的方式评定和管理水资源及证明水如何在气候变化中发挥作用和如何受气候变化影响。

## G.1. 水循环和气候变化

170. 对导致气候变化的大气过程的充分了解和表征加上对水循环范围内水通量更好的量化，对评定水的可获得性至关重要。降水和地表水中的稳定同位素已有几十年被用于破解和量化水文过程、研究大气环流、验证气候模型和模拟当前与过去的气候状况。最初，了解 20 世纪 50 年代和 60 年代核试验产生的大气沉降迁移的需要为了解大气中的水文学过程提供了前所未有的深入认识。“全球降水同位素网”于 1961 年推出，由原子能机构与世界气象组织合作运行，提供关键同位素数据供大气科学、水文学和其他领域的研究使用。

171. 为了了解气候变化对未来降水的影响，必须了解气候变化在地质历史上的影响。从“全球降水同位素网”数据中得出的现代降水的同位素关系是通过使用极地冰和大陆冰、树木年轮、湖泊和海洋沉积物及地下水等环境档案表征古气候中水循环变化的最重要手段。最新分析发展使得能够更容易地获取降水和河水中的稳定同位素数据，导致建立了许多新的监测点，促进扩大了在更精细时空尺度的同位素监测。更简单、更便宜且维护率低的基于激光的仪器正在大大促进基于稳定同位素应用的扩大，这使许多水文学家自己就能进行各自的同位素测量。

172. 涉及环境问题的许多科学学科都将稳定同位素列为自然界中的来源、过程和相互作用的示踪剂。为了进一步增强探知和监测气候对水循环的影响的能力，原子能机构正在建立一个监测河水同位素的全球网络。将现代和历史降水的同位素数据集合在一起，就可提供改进预测未来气候变化影响所用的全球气候模型的手段。

## G.2. 水资源的评定和管理

173. 进行水资源综合管理需要对河流和湖泊中的可用水资源及其与流域规模地下水相互联系的程度作出更精确的估计。虽然地下水目前贡献全球所用全部淡水的一半以上，但对世界范围内浅含水层和深含水层中的可得地下水却只有有限的可靠资料。使用同位素估计地下水来源和水龄对评定地下水资源及其可再生性至关重要，有些情况下还是惟一的手段。地下水中的氡多年来一直被用作最新补给的地下水的主要水文学示踪剂，但这些水在目前的水位往往非常低，难以进行定量解释。不过，若将氡测量与其放射性衰变产物即惰性气体氦-3 的测量相结合，则此系列同位素会有助于量化现代补给。这种信息对保护地下水资源不受污染也十分重要。

174. 鉴于不仅仅是干旱和半干旱地区的水短缺问题，必须发掘更大深度含水层的新淡水资源。在许多情况中，正在抽取过去在不同气候条件下补给的地下水，但对这些地下深处可能是原生水、水龄已有大约数万年到一百万年以上的地下水的数量和流动却知之甚少。在这类含水层中，使用一些水龄指标主要是长寿命放射性核素和惰性气体同位素如碳-14、氦-4 和氦-81 进行同位素测龄，是能够评定这些地下水资源的惟一手

段。虽然碳-14 在好几十年中一直被用作地下水的年龄指标，但其使用却受其半衰期（约 5700 年）和许多含水层中复杂的碳地球化学限制。氦-81 等惰性气体因其化学惰性而在作为年龄指标上具有优势，因为这些同位素不与含水层的地质矩阵相互作用。最新分析发展使得能够精确测定古地下水中这些稀有同位素的一些原子，从而能够估计最多达到 100 万年的地下水水龄。

### **G.3. 今后的方向**

175. 新同位素工具和方案加上创新性分析发展，在最近几年中促进了环境同位素在从水文学和大气科学到生态学和古气候学的许多自然科学中的利用得到显著扩大。这些最新发展对了解、监测和评定气候变化对水资源和其他自然资源的影响至关重要。此外，全面、基于科学的水资源评定对可持续发展也至关重要。更简单、更便宜且维护率低的基于激光的仪器正在大大促进基于稳定同位素应用的扩大，使许多水文学家自己就能进行各自的同位素测量。此外，对需要更先进分析方法来测量惰性气体和长寿命放射性核素的地下水测龄所需的更新型同位素工具的需求预计在不远的将来将持续存在。

## **H. 利用核技术了解海洋环境的变化**

### **H.1. 核技术用于研究全球性变化**

176. 核技术正在被用于研究海洋环境中的二氧化碳。大气二氧化碳的增加正在越来越大地影响着海洋环境，特别是海水的酸度。放射性核素为了解不断变化的碳循环以及不断变化的碳循环如何影响生物提供了强有力的工具。放射性核素还可用于重建海水化学的古变化，以了解当前变化和这些变化将来可能如何影响海洋。

177. 地球上的海洋吸收着人为二氧化碳排放总量的大约 25%，并因此在限制不断增加的大气二氧化碳浓度方面发挥着重要作用。随后，生物活性将这部分二氧化碳中的一小部分吸收到有机碳和碳酸钙粒子中，它们最后发生沉降，此过程被称为“生物碳泵”。天然存在的放射性核素钍-234 可用于量化这种二氧化碳从海洋上部发生生物学移动的速率。了解这一过程的规模和速率对完整了解碳循环至关重要，将有助于我们找到降低海洋酸度的办法。

178. 二氧化碳在被海洋吸收后会使得海水酸化，这反过来又影响到海洋生物。放射性同位素被用于调查海洋生物过程的变化，如响应这种越来越高的酸度而出现的钙化（钙-45）、生物矿化（锶-85）、新陈代谢（锌-65）或痕量元素（如钴-57、钴-60、锰-54 或硒-75）的生物累积。还在利用长寿命块状珊瑚的硼-10 和硼-11 同位素组分研究古海水 pH 值的重建，这反过来可在前瞻性气候模型中用于估计对珊瑚的未来影响。

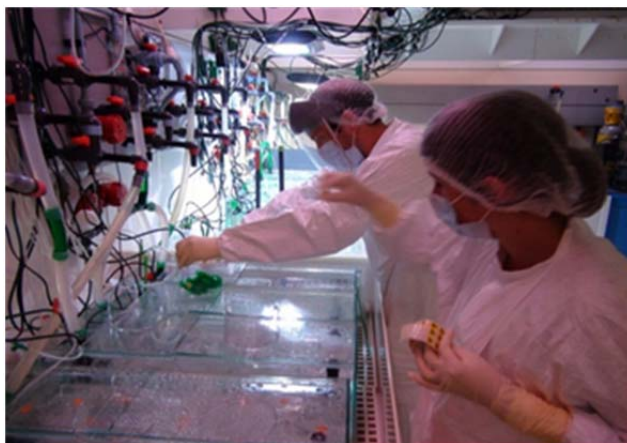


图 H-1. 利用放射性示踪剂（钙-45）了解海洋酸化对海洋生物影响的实验。

179. 二氧化碳和甲烷都是很强的温室气体，它们通过各种来源和沉降物在大气中循环。这些来源和沉降物可利用二氧化碳和甲烷分子的碳 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 和氧 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) 稳定同位素特征中所含的稳定同位素标记物或“指纹”来跟踪。最近几年开发出了光学同位素分析仪，它们能够进行研究二氧化碳和甲烷中微小但动态的大气变化所需的高度精确和准确的测量。而这只能使用由原子能机构提供的国际稳定同位素参考材料校准的空气中符合用途的二氧化碳和甲烷参考气体混合物来实现。

## H.2. 核技术用于研究局地环境变化

180. 有广泛的核和稳定同位素技术可用于研究环境变化和污染过程。它们是重建以前的污染事件以及跟踪污染趋势和污染控制措施有效性的重要工具。这些技术还被用于研究引起沿海富营养化的营养物的陆基污染源、区分人为污染物浓度和天然污染物浓度、确定污染源以进行法证学污染研究以及为了保护人类确定海产品中与有害藻华有关的生物毒素。

181. 持久污染物（如重金属和有机污染物）通常沉积在通常离城市地区、渔场和娱乐场合较近的河口、沿海地区和泻湖的海洋沉积物中。铅-210 可用于测量沉积速率，并因此可用于测量污染物积聚的速率。由于其半衰期为 22.3 年，可构建距今约 100—150 年前的地质年代，并将该年代与核事故或核试验或富养化或有害藻华等环境相关事件等污染事件联系起来。

182. 沿海区域主要由城市排出流和农田径流造成的与人类有关的富养化是许多河口和沿海地区的一个广泛问题。退化症状包括浮游植物的浓度升高、水的透明度降低、溶解氧枯竭以及在某些情况下发生了有害藻华。稳定氮同位素 ( $\delta^{15}\text{N}$ ) 比率被用作含水层生态系统人为富养化的指标，因为沉积有机质和生物群中  $\delta^{15}\text{N}$  值的升高表明发生了向沿海水域的人为氮排放。此外，由于富养化因增加海洋浮游植物繁殖而导致  $\delta^{13}\text{C}$  值升高，对脂类生物标记物的特定化合物碳同位素分析可反映沿海水域中富养化活动的强度。



图 H-2. 同位素比质谱仪用于测量稳定氮和碳同位素比率，以供研究沿海富营养化过程。

183. 确定沿海海洋环境中污染物的来源不仅对了解环境变化过程颇为重要，对规划控制污染的措施也很重要。因此，跟踪污染源的核技术是保护环境和促进可持续提供生态系统服务的宝贵工具。

184. 沿海水域的石油污染是作业性、事故性或非法石油烃排放造成的一个世界性环境问题。日益需要有灵敏而可靠的方法来监测石油污染及其影响，以及制订为监管目的确定石油污染来源的方法。表征溢油的最先进方法以化学指纹识别方案为基础，据此，可使用气相色谱-质谱测定法绘制出一系列石油组分的图谱。但对石油烃中稳定碳同位素 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 比率的分析也可用作补充取证工具，以便对旨在追踪海洋环境中石油来源的浮油指纹识别进行微调。

185. 铅是一种非必需的有毒元素，也可使用同位素比率追踪，以揭示海洋环境中不同的污染来源。铅矿床通常具有不同的同位素组成，它们反映了年龄、来源和形成过程。稳定铅同位素和放射性铅同位素比率特别是相对于唯一天然铅同位素（铅-204）的比率的变化可用于追踪铅污染的来源和路径。



图 H-3. 高分辨率感应耦合等离子体质谱仪用于分析环境样品中的稳定铅同位素。