

第五十五届常会

临时议程项目 17
(GC(55)/1)

2011 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，其中显著突出强调了 2010 年的主要发展情况。
- 《2011 年核技术评论》涵盖以下领域：动力应用、先进的裂变和聚变、原子数据和核数据、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¹提供了与《2011 年核技术评论》相关的补充英文文件，内容涉及辐射肿瘤学技术方面的最新发展、通过食品溯源同位素技术增强食品安全和质量以及有效地利用同位素支持地下水综合管理。
- 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 2010 年年度报告》(GC(55)/2 号文件)，特别是其中的技术部分，还可参阅《2010 年技术合作报告》(GC(55)/INF/2 号文件)。
- 该文件已经修改，以便尽可能考虑理事会的具体意见和从成员国收到的其他意见。

¹ <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC55/Agenda/index.html>。

目 录

2011 年核技术评论	1
正文摘要	1
A. 动力应用	5
A.1. 当今的核电	5
A.2. 核电的预期增长	7
A.3. 燃料循环	9
A.3.1. 铀资源和生产	9
A.3.2. 转化、浓缩和燃料制造	10
A.3.3. 燃料循环后端	11
A.3.4. 放射性废物管理和退役	12
A.4. 安全性	14
B. 先进的裂变和聚变	16
B.1. 先进的裂变	16
B.1.1. 水冷堆	16
B.1.2. 快中子系统	17
B.1.3. 气冷堆	18
B.1.4. “革新型核反应堆和燃料循环国际项目”和“第四代国际论坛”	18
B.2. 聚变	19
C. 原子数据和核数据	20
D. 加速器和研究堆的应用	22
D.1. 加速器	22
D.2. 研究堆	23
E. 粮食和农业领域的核技术	26
E.1. 改进牲畜的繁殖力和健康	26
E.2. 虫害防治	27
E.3. 作物改良	28
E.4. 土壤和水管理	30
E.4.1. 评定农田中土壤碳整合的新前沿	30
E.4.2. 利用磷酸盐的氧同位素示踪磷的来源和在土壤中的循环	31
F. 人体健康	31
F.1. 营养学	31
F.2. 辐射肿瘤学应用领域的进步	32
F.3. 核医学技术在心脏病学研究方面的新发展	32

G.	环境	33
G.1.	利用核技术进行海洋有害藻华的早期预警	33
G.2.	利用长寿命放射性核素了解环境过程	34
H.	水资源	35
I.	放射性同位素生产和辐射技术	36
I.1.	放射性同位素和放射性药物	36
I.1.1.	成像和治疗用分子靶标制剂	36
I.1.2.	钼-99 和锝-99m 的供应保证	36
I.2.	辐射技术应用	37
I.2.1.	用于沉积物管理的综合放射性示踪剂和计算机模拟方案	37
I.2.2.	低能电子束加速器	38

2011 年核技术评论

总干事的报告

正文摘要

1. 对 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继续进行评定。由于本报告侧重于 2010 年的发展情况，因此，这次事故及其影响在此不作涉及，而将在原子能机构今后的报告中加以论述。
2. 2010 年，有 16 座新核动力堆开工建设，这是 1985 年以来开工建设数量最多的一年。在这一年中，有五座新反应堆并网，而只有一座反应堆退役，这使全世界的核电总装机容量达到 375 吉瓦（电）。2010 年经修订的对今后核电增长的预测仍显示对扩大核电的预期很高。
3. 扩大以及近期和远期的增长前景仍以亚洲为中心。目前在建的反应堆中有三分之二在亚洲，而 16 座开工建造的反应堆中有 13 座也在亚洲，其中仅中国就有 10 座开工建设。2010 年继续保持了在运反应堆提高出力和更新或延长许可证的趋势，这在一些欧洲国家尤其如此，这些国家继续呈现出对限制今后利用核电的政策进行重新审议的趋势。对启动新核电计划的兴趣仍然很高，有 60 多个成员国已向国际原子能机构表示有兴趣考虑引进核电。
4. 在 2010 年版的经合组织核能机构-原子能机构“红皮书”中，尽管对低于 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，但在很大程度上由于哈萨克斯坦提高了铀产量，全世界的铀生产总量则显著增加。虽然铀的现货价格在 2009 年下降，并且在 2010 年初和 2010 年中一直在 105 美元/千克铀和 115 美元/千克铀之间波动，但到 2010 年底时则创下了两年来的最高水平，最高时达到 160 美元/千克铀。
5. 理事会在 2010 年 12 月核准建立原子能机构低浓铀银行。该银行作为确保电力生产最后的供应手段，将由原子能机构所有和管理。也是在 12 月，在原子能机构主持下的低浓铀储备库在俄罗斯联邦安加尔斯克启用，该储备库拥有 120 吨低浓铀，足够供一座 1000 兆瓦（电）动力堆的两个完整燃料堆芯使用。
6. 50 多个成员国目前正在考虑替代方案或已开始制订适合本国废物存量的处置方

案。2010年1月，斯洛文尼亚将一项法令付诸生效，确认了建立中低放废物处置库的场址。

7. 2010年11月，欧洲委员会印发了一项建议，要求欧盟理事会制订关于乏燃料和放射性废物管理的指令，包括要求欧盟成员国提出国家计划，说明它们将在何时、何地和如何进行旨在确保最高安全标准的最终处置库的建设和管理。芬兰和瑞典目前正在编写专供用于乏燃料的深部地质设施的建造许可证文件。法国核安全管理局已提出了新版本的放射性废物管理国家计划。

8. 在美国，继美国政府在2009年决定不进行尤卡山深部地质处置库的建造后，于2010年1月设立了美国核未来蓝带委员会。预计该委员会将于2011年7月发表其首份中期报告。

9. 原子能机构继续向将研究堆燃料返还原产国的成员国和国际计划提供支助。作为俄罗斯研究堆燃料返还计划的一部分，向俄罗斯联邦返还了约109千克高浓铀新鲜燃料和376千克高浓铀乏燃料。2010年底，从塞尔维亚温萨向俄罗斯联邦运输了2500千克降质研究堆乏燃料。在温萨的这一返还工作还标志着成功实施了原子能机构历史上资金投入最多的技术合作项目。

10. 在中国，65兆瓦（热）（20兆瓦（电））池式中国实验快堆在2010年7月21日首次达到临界。在日本，2010年5月6日重新启动了280兆瓦（电）原型快中子增殖堆，目前已经开始进行确认性测试。

11. 在核聚变方面，国际热核实验堆在2010年7月正式进入建造阶段。预计将于2019年11月产生第一束等离子体。在美国的“国家点火装置”也取得了显著进展，于2010年1月实现了1兆焦耳的脉冲。

12. 用于疾病早期诊断的快速和准确的核和核相关技术的开发、试验、验证和实施在2010年提高粮食安全方面发挥了主要作用。例如，正在阿根廷和格鲁吉亚开发预防牛布氏杆菌病（一种广泛分布的动物传染疾病）的疫苗；在埃塞俄比亚、苏丹和斯里兰卡开发预防寄生虫感染的疫苗；在中国和土耳其开发预防泰勒虫病的疫苗；在印度和肯尼亚开发预防锥虫病的疫苗；在泰国开发预防边虫病的疫苗以及在伊朗伊斯兰共和国开发预防鱼源性寄生虫的疫苗。

13. 提高生产率和确保全球粮食安全的一个重要战略组成部分将是增加在虫害防治方面的投入。2010年出版了粮农组织/原子能机构一个协调研究项目的会议文集，该项目汇集了来自15个国家的18个研究团队。项目的结果提供了使用电离辐射为利用捕食者和拟寄生物作为昆虫不育技术补充的生物控制的实施带来增值的一系列创新办法，从而以环境友好的方式防治虫害。

14. 2010年，继续成功地利用植物遗传物质的突变或自然发生的可遗传变化来确定和选择对作物改良至关重要的特性。用于突变诱发的核技术能够提高遗传变化的速率，

并因此增加作物对气候变化和多变性的适应性。开发了基于突变诱发及增效分子技术和生物技术的一揽子核技术，包括组织培养和高通量分子技术，以帮助确定和开发适应气候变化和多变性的重要特性。

15. 在人体健康领域，2010 年继续在辐射肿瘤学方面取得的进步正在导致改进治疗，现已能够更精确地将辐照量与肿瘤形状相匹配，从而更好地保护健康的邻近组织。三维适形放射性治疗正在被用于设定治疗区，以聚焦于目标肿瘤。

16. 呼吸门控放射治疗考虑到在患者呼吸过程中器官和肿瘤的移动。这对位于胸部、喉部、腹部、前列腺和膀胱以及整个骨盆上的肿瘤尤其有意义。在这种由计算机驱动的放射治疗中，程序对移动作出分析，并在适当时刻触发治疗束。

17. 过去三年中在核医学领域取得的进步已导致对患者的扫描时间以及施用的辐射剂量减少，同时提高了总体成像质量，这使得能够更有信心和更高效地进行心血管疾病的诊断。新的探测器材料如碲锌镉连同聚焦针孔准直和三维重建现已被用于传统的单光子发射计算机断层照相法成像，以减少扫描时间。

18. 沿海地区有害藻华的爆发可破坏为国内食用和出口目的而收获的海产品，进而导致显著的经济损失。核技术能够有助于准确而迅速地评定这种有害藻华，为国家监管机构确保海产品安全的工作提供支持。2010 年追求卓越分析科学协会年会确定基于利用放射性标记毒素的核技术“受体结合分析法”为已经在预验证研究中进行了成功试验的两个先进替代方法之一。

19. 长寿命放射性核素目前正在被用于调查海洋资源和海洋学过程以及评定海洋污染情况，从而为海岸带管理提供支持。由于放射性核素自身随着时间的推移而衰变，因而使研究人员能够进行大规模环境过程的年代测定和研究及获得以其他方式不能获得的信息。

20. 稳定同位素和放射性同位素正在被用于对例如南美洲的瓜拉尼含水层系统、摩洛哥的塔尔达流域和非洲北部的努比亚沙岩含水层系统的地下水资源进行具有时间效益和成本效益的研究。获得的同位素数据在 2010 年被用于确认传统水文学研究的结果和提供对地下水流量和含水层动态的深入认识，所有这些都促进了地下水综合管理。

21. 放射性同位素和放射性药物的重要性在 2010 年继续提高。利用高度特异放射性药物作为基础疾病分子过程的生物标记的方法被称为“分子成像”，这种利用正在越来越多，因为这种生物标记要么可以作为疾病的早期指标，要么可以作为测量治疗功效的客观参数，这种方法特别对癌症患者尤其重要。

22. 技术上的挑战导致了反复性、持续性而且常常同时发生的研究堆关闭，从而促成了 2007 年后期开始出现的钼-99 供应危机进一步延长。在整个 2010 年期间，为提高需求方效率、减少运输挑战和核准有能力的反应堆进行靶件辐照所作的全球范围的协调努力对于减轻这种危机的影响起到了很大的帮助作用。南非于 2010 年成为出口供应工

业规模数量基于低浓铀的钼-99 的第一大生产商，俄罗斯联邦季米特洛夫格勒原子反应堆研究所也于 2010 年 12 月开始了大规模的钼-99 生产。裂变产生的钼-99 以及随后的锝-99m 发生器供应面临短缺也导致对探索和开发其生产所用替代技术尤其是不使用高浓铀的替代技术的兴趣增加。此外，利用基于加速器的方案将有助于减轻对在裂变钼-99 行业服役的老化反应堆的完全依赖。加拿大研究人员正在研究基于回旋加速器的锝-99m 直接生产，以作为座落在低/中能回旋加速器附近的医学中心在近期的一种替代方法。

23. 工业辐射技术应用的最近发展包括开发了用于沉积物管理的综合放射性示踪剂和计算机模拟方案。2009—2010 年，利用钷-46 标记的玻璃粉作为示踪剂在印度一个现有的倾倒地和两个拟议中的倾倒地进行了放射性示踪剂调查。结果表明，现有倾倒地和一个拟议中的倾倒地适合于倾倒地疏浚底泥，而另一个拟议中的倾倒地则不适合。

A. 动力应用

A.1. 当今的核电

24. 开工建设的新反应堆的数量连续七年增加。虽然远未达到 1976 年 44 座反应堆的峰值，但 2010 年 16 座反应堆开工建设仍是自 1985 年以来的最高数量，它标志着较之 20 世纪 90 年代和 21 世纪初的数量有了显著增加。

25. 截至 2010 年 12 月 31 日，全世界共有 441 座核动力堆在运行，总容量达到 375 吉瓦（电）（见表 A-1）。这表示比 2009 年底的总容量增加了约 4 吉瓦（电），其主要原因是有五座新反应堆并网。（中国的岭澳 3 号反应堆（1000 兆瓦（电））和秦山二期 3 号反应堆（610 兆瓦（电））、印度的拉贾斯坦 6 号反应堆（202 兆瓦（电））、俄罗斯联邦的罗斯托夫 2 号反应堆（950 兆瓦（电））和大韩民国的新古里 1 号反应堆（960 兆瓦（电））以及只有一座反应堆（法国的 130 兆瓦（电））凤凰堆退休）。

26. 2010 年有 16 座反应堆开工建设，它们是：巴西的安格拉 3 号反应堆；中国的昌江 1 号和 2 号反应堆、防城港 1 号和 2 号反应堆、福清 3 号反应堆、海阳 2 号反应堆、宁德 3 号和 4 号反应堆、台山 2 号反应堆和阳江 3 号反应堆；印度的塔拉普尔 3 号和 4 号反应堆；日本的大间反应堆；俄罗斯联邦的列宁格勒二期 2 号反应堆和罗斯托夫 4 号反应堆。相比之下，2009 年有 12 座反应堆开工建设，另有两座反应堆复工建造，而 2008 年有 10 座反应堆开工建设。

27. 截至 2010 年 12 月 31 日，共有 67 座反应堆在建造，是自 1990 年以来在建数量最多的一年。

28. 扩大以及近期和远期的增长前景仍以亚洲为中心。2010 年开工建设的 16 座反应堆中，有 13 座在亚洲。如表 A-1 所示，在建的 67 座反应堆有 45 座在亚洲，最近并网的 43 座新反应堆中有 34 座也在亚洲。

29. 2010 年继续保持了许多在运反应堆提高出力和更新或延长许可证的趋势。在美国，核管理委员会对内布拉斯加州库珀核电站和爱荷华州杜安·阿诺德能源中心进行了延长 20 年的运行许可证更新，使得自 2000 年以来已批准的许可证更新的总数达到 61 个。此外，美国核管会还在 2010 年批准了六个提高出力申请，而且正在对总计约 1355 兆瓦（电）的 12 个提高出力申请进行审查。在英国，核装置检查局批准了双机组威尔法核电厂的运行许可证再延长两年。而且，它批准了哈特尔浦和希舍姆 1 号四座反应堆的许可证从 30 年延长至 35 年。在俄罗斯联邦，俄罗斯监管部门联邦环境、技术与核监督服务局为列宁格勒核电厂 4 号机组颁发了 15 年运行延期许可证。

表 A-1. 全世界正在运行和在建的核动力反应堆（截至 2010 年 12 月 31 日）^a

国 家	在运反应堆		在建反应堆		2009 年供应的核电量		截至 2010 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	月
阿根廷	2	935	1	692	6.69	5.91	64	7
亚美尼亚	1	375			2.29	39.42	36	8
比利时	7	5 926			45.73	51.16	240	7
巴西	2	1 884	1	1 245	13.90	3.06	39	3
保加利亚	2	1 906	2	1 906	14.24	33.13	149	3
加拿大	18	12 569			85.50		600	2
中国	13	10 058	28	28 230	70.96	1.82	111	2
捷克共和国	6	3 678			26.44	33.27	116	10
芬兰	4	2 716	1	1 600	21.89	28.43	127	4
法国	58	63 130	1	1 600	410.09	74.12	1 758	4
德国	17	20 490			133.01	28.38	768	5
匈牙利	4	1 889			14.66	42.10	102	2
印度	19	4 189	6	3766	20.48	2.85	337	3
伊朗伊斯兰共和国			1	915				
日本	54	46 821	2	2 650	280.25	29.21	1 494	8
大韩民国	21	18 698	5	5 560	141.89	32.18	360	1
墨西哥	2	1 300			5.59	3.59	37	11
荷兰	1	482			3.75	3.38	66	0
巴基斯坦	2	425	1	300	2.56	2.60	49	10
罗马尼亚	2	1 300			10.70	19.48	17	11
俄罗斯联邦	32	22 693	11	9 153	159.41	17.09	1026	5
斯洛伐克	4	1 816	2	782	13.54	51.80	136	7
斯洛文尼亚	1	666			5.38	37.30	29	3
南非	2	1 800			12.90	5.18	52	3
西班牙	8	7 514			59.26	20.09	277	6
瑞典	10	9 303			55.73	38.13	382	6
瑞士	5	3 238			25.34	38.01	179	11
乌克兰	15	13 107			83.95	48.11	383	6
英国	19	10 137	2	1900	56.85	15.66	1 476	8
美利坚合众国	104	101 240	1	1 165	807.08	19.59	3 603	11
总计 ^{b,c}	441	375 267	67	64 064	2629.95	NA	14 353	4

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：总计包括了台湾的下列数据：

中国台湾：六台机组，4982 兆瓦（电）在运行；两台机组，2600 兆瓦（电）在建；核发电量为 39.89 太瓦·小时，占总发电量的 19.3%。

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（176 年零 1 个月）的已关闭核电厂。

30. 在以往对未来使用核电加以限制的一些欧洲国家，2010年继续呈现出在2009年开始出现的重新考虑这些政策的趋势。在西班牙，政府批准了装有两个机组的阿尔玛雷兹核电站和范德洛斯核电站2号机组为期10年的许可证延期。2010年11月，欧洲委员会正式启动对欧盟的“战略能源技术计划”提供支持的“欧洲可持续核工业倡议”。“欧洲可持续核工业倡议”与起支持作用的研究基础结构、燃料设施和研究与发展工作一道，旨在解决对第四代快中子堆技术进行验证的需要。“欧洲可持续核工业倡议”重点涉及下一代核系统原型的设计和建造、延长现有核电站运行寿期的途径和放射性废物长期管理解决方案的制订。

31. 对审查将核电计划作为一个备选方案的兴趣仍然高企，有60多个成员国已向原子能机构表示有兴趣考虑引进核电。原子能机构向这些成员国提供了包括标准和导则、增加技术援助、评审服务、能力建设和知识网络在内的广泛援助。原子能机构于2010年12月在泰国开展了综合核基础结构评审工作组访问。

A.2. 核电的预期增长

32. 原子能机构每年都要对其全球核电增长的低值预测和高值预测进行更新。在2010年，尽管世界经济持续萧条，但普遍对该技术的前景抱有很高的期望。从2010年对原子能机构全球容量低值预测的修订可以看出，这一预测在2030年增加到546吉瓦（电），而2009年的预测是511吉瓦（电）。在更新后的高值预测中，全球容量将达到803吉瓦（电），比2009年的预测值807吉瓦（电）略有减少。2030年的高值预测和低值预测之间的裕度虽然减少到257吉瓦（电），但依然很高。

33. 2010年对亚洲的这两种预测所作上调的幅度最大，在该地区不仅包括像中国、印度、日本、大韩民国和巴基斯坦这样目前拥有商业核电计划的国家，而且还包括可以合理地预期在2030年之前拥有在运核电站的若干新加入国（见图A-1）。在低值预测中，2009年和2030年之间，仅这一地区就占到核电容量净增长的85%。对能源的高度需求特别是对电力的需求是由持续增长的人口、加速经济发展的愿望和能源安全关切所驱动的。这种高能源需求加上很可能以高价易波动的化石燃料价格和环境考虑因素为特征的前景都在鼓励探索低碳能源供应，而核电则是其中的一个组成部分。

34. 根据2010年的预测，世界其他地区在核发电容量方面仅显示出适度的预测增长，但独联体国家除外，这些国家的预测增长较为显著。由于经济恢复缓慢、对有关气候变化的国际环境新协定和总体前景的不确定以及在金融危机之后持续采取的金融保守行为所致电力需求的不确定性已导致在欧洲和北美存在一种“等着瞧”的态度。在北美，近来页岩天然气供应的蓬勃发展可能导致了预期放缓。

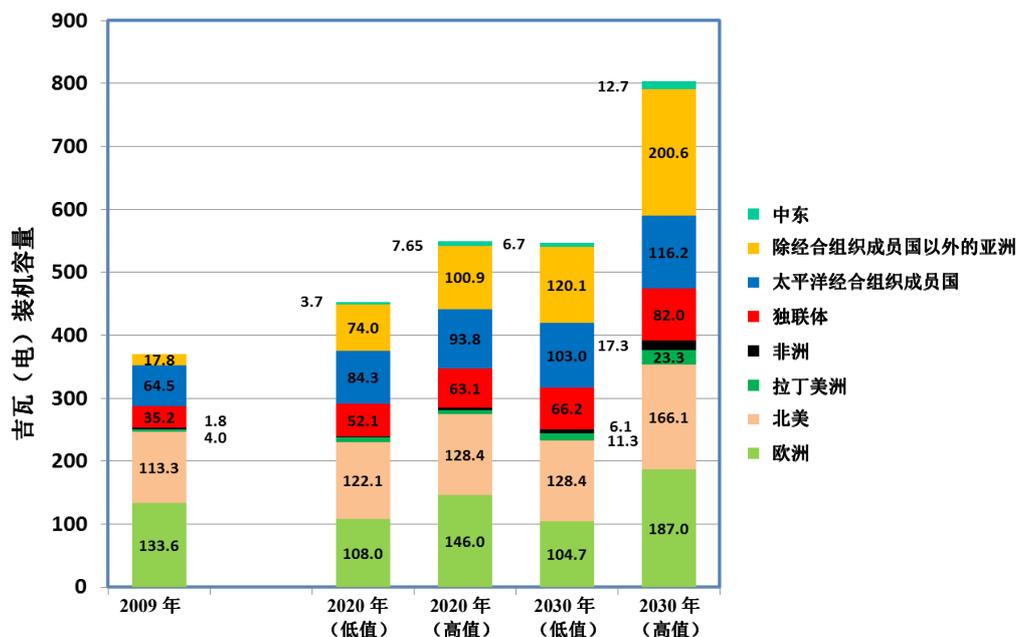


图 A-1. 2010 年对 2009—2030 年各地区核电容量发展所作的低值和高值预测。

35. 高值预测表明，在 2010 年，驱动预期增长的中长期因素再次成为一种主导力量，这些因素尤其是核电厂持续保持良好的实绩和安全、对全球变暖的持续关切、能源供应安全和高价易波动的化石燃料价格以及预测的中长期能源需求持续增长。2010 年预测的更快的经济恢复引起电力需求增加，从而导致所有地区核发电量的增长。亚洲仍占全球容量增长的近 60%，并再次在高值预测中处于首要地位。其余的增长出现在经济合作与发展组织（经合组织）和独联体中传统的核电国家，同时新加入国显露出在 2025—2030 年强劲进入市场的初期迹象。

36. 经合组织国际能源机构《2010 年世界能源展望》预测与原子能机构 2010 年的预测具有大体相似的发展趋势，其“当前政策假想方案”预测到 2030 年全球总装机容量为 535 吉瓦（电）（相比之下，原子能机构的低值预测为 546 吉瓦（电）），而按百万分之 450 假想方案²，到 2030 年核电容量将达到 760 吉瓦（电）（接近原子能机构高值预测的 803 吉瓦（电））。

² 百万分之 450 假想方案将大气温室气体的最大浓度限制在百万分之 450，并意味着全球能源系统的实质性转变。

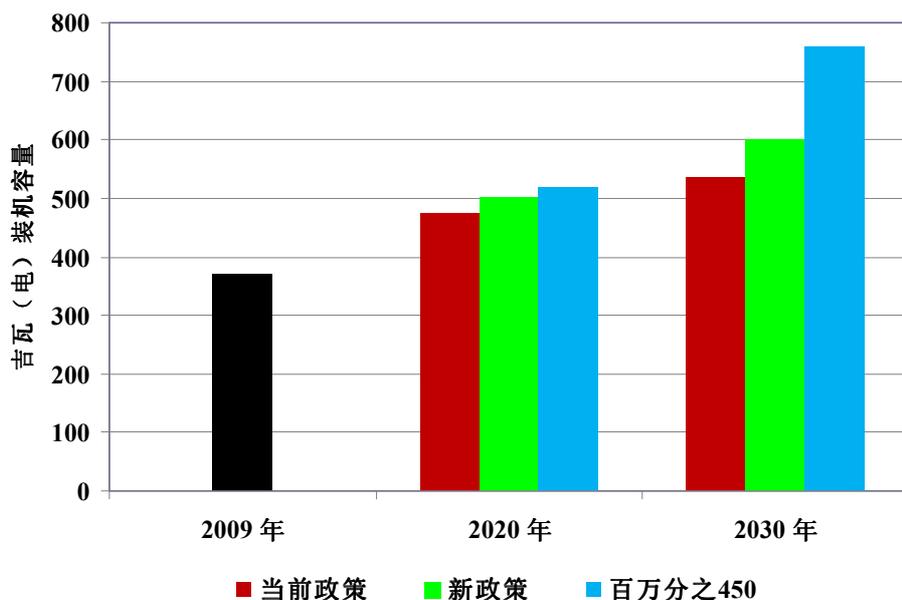


图 A-2. 2009 年至 2030 年不同政策对全球核电发展的影响（来源：《2010 年世界能源展望》）。

A.3. 燃料循环³

A.3.1. 铀资源和生产

37. 2010 年，经合组织核能机构和原子能机构共同出版了最新版“红皮书”——《2009 年铀资源、生产和需求》。可以低于 130 美元/千克铀的成本回收的已确定常规铀资源估计为 540 万吨。这比上一版估计的少了 1.2%。此外，可以介于 130 美元/千克铀和 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 90 万吨铀，使得可以低于 260 美元/千克铀的成本回收的已确定常规资源总量达到 630 万吨铀。为参考起见，2010 年铀的现货价格直到年中都在 105 美元/千克铀和 115 美元/千克铀之间波动，随后逐渐走强，到年底升顶到 160 美元/千克铀，创下两年来的最高价格。

38. “红皮书”报告的未探明资源总量（预计和推测储量）达到 1040 多万吨铀，与上一版（2008 年出版）报告的 1050 万吨铀略有下降。成本低于 130 美元/千克铀的未探明的常规资源估计为 650 万吨铀，成本介于 130 美元/千克铀和 260 美元/千克铀之间的还有 37 万吨铀。这些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的更多推测性的资源。估计还另有 360 万吨的推测性铀资源，其生产成本还未确定。

39. 非常规铀资源和钍进一步扩大了资源基础。非常规资源包括海水中的铀和铀仅作为一种少量副产品回收的资源中的铀。目前，很少有国家报告非常规资源。与磷酸盐、有色金属矿石、碳酸岩、黑色页岩和褐煤伴生的潜在可回收铀的以往估计量为 1000 万

³ 有关原子能机构燃料循环活动的更详细资料可见最新的“年度报告”（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2010>）相关部分和 <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/index.html>。

吨铀量级。估计世界范围内的铀资源约有 600 万吨。尽管铀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加以考虑之前还需要开展进一步的工作。

40. 只有 2008 年“红皮书”报告了全球勘探和矿山开发费用数据。2008 年的费用总额为 16.41 亿美元，比上一版“红皮书”报告的 2006 年的数字增加了 133%。

41. 2009 年，全世界的铀产量超过 50 770 吨铀，比 2008 年的 43 800 吨铀增长 16%。估计 2010 年铀产量将增加到 55 000 吨铀。澳大利亚、加拿大和哈萨克斯坦 2009 年的铀产量占到世界总产量的 63%。这三个国家加上纳米比亚、尼日尔、俄罗斯联邦、乌兹别克斯坦和美国占到产量的 93%。哈萨克斯坦 2009 年的铀产量比 2008 年增长了 70%以上，使其成为 2009 年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 2010 年的总产铀量预计将比 2009 年增加 30%。马拉维 2009 年以 100 吨铀产量起步，2010 年增加到 660 吨铀。

42. 2009 年的铀产量仅涵盖全世界反应堆 61 730 吨铀估计需求的约 82%。其余部分由以下五类二次来源提供：天然铀库存、浓缩铀库存、乏燃料后处理得到的铀、由来自后处理乏燃料的钚-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 2009 年消耗率，可以低于 130 美元/千克铀回收的 540 万吨铀的已确定常规铀资源的预测使用期限差不多为 90 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。

43. 基于 2010 年所作的预测，世界反应堆相关的年度铀需求据预测到 2035 年将上升到 87 370 吨铀和 138 165 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。在上述期限之后，为了使产量能够提供所有反应堆包括到 2035 年并入到电网的新反应堆整个运行寿期所需的燃料，将需要探明新的资源、开发新的矿山并及时扩大现有矿山。

A.3.2. 转化、浓缩和燃料制造

44. 全球总转化能力就六氟化铀而言 2010 年仍稳定在约为每年 7.6 万吨天然铀，就二氧化铀而言仍稳定在每年 4500 吨天然铀。六氟化铀转化需求也稳定在大约每年 6.2 万吨天然铀。

45. 全球总浓缩能力目前约为每年 6000 万分离功单位，而总需求将近每年 4500 万分离功单位。为了替换利用气体扩散的老旧设施，而且预期全球核电的扩张，目前正在开发或在建的有全部利用离心机浓缩的四座新的商业规模浓缩设施，它们是法国的乔治·贝斯 II 以及美国的美国离心分离厂、阿雷瓦公司鹰石设施和铀浓缩公司的美国设施（前称“国家浓缩设施”）。乔治·贝斯 II 从 2010 年 12 月交付第一个铀容器开始商业运行。至于铀浓缩公司的美国设施，其商业运行始于 2010 年 6 月。此外，美国核管会还就全球激光浓缩公司在北卡罗来纳拟议的 300 万至 600 万分离功单位激光浓缩设施发表了一份有利的安全评价报告。全球激光浓缩公司已经成功地完成了激光激发同位素分离浓缩技术试验回路计划的初始阶段。

46. 日本核燃料有限公司预计在 2011 年至 2012 年开始对经过改进的六所村离心机级联进行商业运行，并将浓缩能力从现在的 15 万分离功单位扩大至 2020 年的 150 万分离功单位。2010 年，亚美尼亚和乌克兰与哈萨克斯坦和俄罗斯联邦一道成为 2007 年在俄罗斯联邦安加尔斯克设立的国际铀浓缩中心的成员。在皮尔卡尼耶乌重建其气体扩散能力的同时，阿根廷还一直在进行新浓缩技术如离心和激光浓缩技术等的研究与发展工作。预计重建后的皮尔卡尼耶乌厂将在 2011 年开始运行。

47. 2010 年，有三座去转化设施投产，其中，美国有两座（分别在肯塔基州帕迪尤卡和俄亥俄州朴茨茅斯），俄罗斯联邦有一座（在克拉斯诺亚尔斯克电化学厂）。全球现有的总去转化能力约为每年 6 万吨。

48. 理事会于 2010 年 12 月核准将由原子能机构所有和管理的原子能机构低浓铀银行，作为促进核电生产的最后供应手段，如果一成员国的低浓铀供应中断，而且这种供应无法通过商业市场、国与国安排或任何其他此类手段恢复，该成员国可以要求原子能机构低浓铀银行确保低浓铀供应。建立低浓铀银行是旨在确保燃料用核材料供应的补充手段，这一举措源于理事会 2009 年 11 月核准的一项协定，该协定由原子能机构与俄罗斯联邦于 2010 年 3 月签署，目的是建立供应原子能机构成员国的低浓铀储备。2010 年 12 月，该燃料储备库由俄罗斯国家原子能公司储满其计划的 120 吨低浓铀容量，并在西伯利亚安加尔斯克核设施被置于原子能机构保障之下。

49. 全球燃料总制造能力就轻水堆燃料而言目前约为每年 1.3 万吨（浓缩铀），就加压重水堆燃料而言约为每年 4000 吨（天然铀）。总需求也稳定在大约每年 10 400 吨天然铀。中国、大韩民国和美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 400 吨天然铀能力的制造设施是阿雷瓦集团公司与哈萨克斯坦国家原子能公司的一个合资企业，预定于 2014 年竣工。

50. 铀-钚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也有一些规模较小的设施。2010 年 10 月，日本核燃料有限公司开始在青森县六所村开始建造新的混合氧化物燃料制造设施（130 吨重金属混合氧化物）。该设施计划于 2016 年 3 月竣工。俄罗斯联邦也计划在谢维尔斯克（托木斯克 7 号）建造类似的设施。俄罗斯联邦还计划了一座每年制造 60 吨混合氧化物燃料的设施和一座每年制造 14 吨快中子堆用致密混合氮化物燃料的设施。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。美国正在利用多余的武器级钚建设新的混合氧化物燃料制造能力。日本的伊方-3 号和福岛第一-3 号于 2010 年开始使用混合氧化物燃料。全球目前共有 33 座热堆使用混合氧化物燃料。

A.3.3. 燃料循环后端

51. 全球已卸出的乏燃料总量接近 32 万吨重金属，其中，约 9.5 万吨重金属已进行了后处理，约 22.5 万吨重金属贮存在反应堆的乏燃料贮存池或离堆贮存设施。离堆贮存

设施正在定期予以扩大。全球总后处理能力约为每年 5000 吨重金属。目前定于 2012 年竣工的日本新的六所村后处理厂已经开始最后调试试验。中国正在建造一座后处理中试厂，并在 2011 年底完成了热试运行。中国还正计划建造一座商业后处理设施，其选址过程仍在进行中。

52. 中国已在秦山核电厂开始将再循环铀直接用作坎杜堆燃料的验证。

53. 印度正在建造第一座快堆燃料循环设施，其中包括一座燃料制造和后处理厂、一座堆芯子配件厂、一座后处理铀氧化物厂和一座服务于即将建成的 500 兆瓦原型快中子增殖堆的废物管理厂。

A.3.4. 放射性废物管理和退役

54. 2008 年（可提供的最新年份）报告处于贮存中的全球放射性废物存量约为 1760 万立方米⁴（表 A-2）。已处置的放射性废物量约为每年 64 万立方米，主要为低放和极低放废物（以下称“短寿命中低放废物”⁵）。到 2008 年的总处置量接近 2460 万立方米。处理过的高放废物年累积量相当恒定，全球范围每年的平均累积率接近 850 立方米。

表 A-2. 2008 年全球放射性废物存量估计数

废物分类	贮存 [立方米]	累积处置量 [立方米]
短寿命中低放废物	3 618 000	24 349 000
长寿命中低放废物	13 609 000	208 000
高放废物	384 000	4 000

来源：网基废物管理数据库，2010 年。

55. 若干国家继续利用热坩埚感应或焦耳加热熔炉对高放废物进行玻璃固化。法国阿格 R7 工厂使用冷坩埚感应熔炉仍然是该领域取得进展的一个例子。在英国，塞拉菲尔德玻璃固化厂 2009 年实现了一个主要的里程碑，它完成了第 5000 个高放固体废物容器的生产。日本核燃料有限公司 2010 年在玻璃固化装置方面继续遭遇挑战，而且不得不将六所村后处理厂的商业运行再推迟两年。在美国汉福德，世界上最大废物处理厂的建造工作已完成约 50%。预计于 2019 年开始运行的这个耗资 120 亿美元的废物处理厂将通过预处理并随后通过玻璃固化方式处理并稳定约 20 万立方米的各种复杂的遗留废物。

⁴ 利用原子能机构“网基废物管理数据库”和其他公开来源（对于不向该数据库报告的国家）得出的估计数。

⁵ “网基废物管理数据库”的存量目前按《安全丛书》第 111-G-1.1 号《放射性废物分类》（1994 年）所载已被取代的原子能机构废物分类建议进行报告。这些建议目前已被《一般安全导则》第 GSG-1 号《放射性废物分类》（2009 年）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。

56. 50 多个成员国目前正在考虑替代方案或已开始制订适合本国废物存量的处置方案。所考虑的方案包括：深沟处置极低放废物（法国、西班牙）、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）或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、立陶宛、罗马尼亚、斯洛文尼亚）；中等深度处置中低放废物（匈牙利、大韩民国、日本）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）和废密封源（加纳、伊朗伊斯兰共和国、菲律宾）。芬兰和瑞典目前正在编写专用于乏燃料深部地质设施的建造许可证文件。

57. 2010 年 1 月，斯洛文尼亚确认中低放废物处置库场址的一项法令开始生效。该场址位于斯洛文尼亚目前惟一的核电厂附近。其建造工作定于两到三年后开始进行。在加拿大，核废物管理组织于 2010 年 5 月向感兴趣的团体发出邀请，从而开始了为乏核燃料深部地质处置库选择永久贮存场址的过程。在德国，已开始在下萨克森州前康拉德铁矿山建造一座地下中低放废物处置库。在瑞典，瑞典核燃料和废物管理公司于 2011 年 3 月提交了将其乏燃料最终地质处置库设在东哈马尔市的申请。该核燃料处置库的建造工作应于 2015 年开始，预计于 2025 年开始处置作业。在芬兰奥尔基卢奥托场址，Onkalo 进出隧洞到 2010 年底已挖掘到 4570 米长和 434 米的最终处置深度。Onkalo 最初将起到地下岩石表征设施的作用，以确保该场址的适宜性。该进出隧洞随后将被用于处置。预计将于 2012 年提出建造许可证申请，并在 2020 年前后办理运营许可证手续。

58. 在美国，继美国政府在 2009 年决定不进行尤卡山深部地质处置库的建造后，于 2010 年 1 月设立了美国核未来蓝带委员会。该委员会旨在就制订管理美国乏核燃料和核废物的长期解决方案提出建议，并计划解决短则 120 年长到 300 年时期的乏燃料临时贮存问题。第一份中期报告定于 2011 年 7 月提交，该委员会的最后报告预计将于 2012 年提交。此外，美国核管会主席还于 2010 年 10 月命令其工作人员停止审查尤卡山许可证申请。

59. 法国核安全管理局已提出了新版本的国家放射性物质管理计划。该计划包括一个长期的、可逆的高放和中放废物地质处置项目和一个长期的低放废物浅部处置项目。法国正在进行建造其高放废物地质处置库的准备工作，该设施还将容纳全国的中放废物。

60. 已经与原子能机构共同发起了许多双边和多边倡议，以改进对密封放射源的控制以及将源从不安全和不可靠的场所移走。高活度源由于有重要的制约因素妨碍方便地对其进行移动，因此尤其成问题。乌拉圭 2010 年利用南非核能公司根据与原子能机构的合同开发的移动热室技术，从装有高活度源部件的装置中取出了 14 个高活度源部件，并将其包装后装入用于返还原产国的运输容器中。

61. 2010 年 11 月，欧洲委员会印发了一项关于乏燃料和放射性废物管理的理事会指令的建议，内容包括要求欧盟成员国提出国家计划，说明它们将在何时、何地 and 如何建设和管理旨在确保最高安全标准的最终处置库。

退役

62. 全球动力堆退役统计数字 2010 年没有大的变化。年底关闭了 124 座动力堆。其中有 15 座反应堆已被完全拆卸，52 座处于拆卸过程中或计划短期内予以拆卸，48 座被置于安全关闭模式，3 座已经被埋葬，另外 6 座尚未确定退役战略。

63. 2009 年 7 月开始了澳大利亚第一座即将退役的反应堆即澳大利亚核科学和技术组织 Moata 研究堆的拆卸过程，将初步拆卸和移出所有内部部件。生物屏障的拆除工作于 2010 年 3 月开始，并于 2010 年 9 月完成。在商定的预算范围（420 万澳大利亚元）内，并在从收到退役许可到解除场址监管的总共两年的项目期间成功地完成了 100 千瓦（热）阿贡诺型反应堆的退役工作。

64. 在中欧和东欧，随着保加利亚、立陶宛、斯洛伐克和乌克兰正在开展的项目的进行，已关闭的反应堆已开始加速退役。中欧和东欧的所有核电厂已遵照原子能机构的建议制订了或者接近完成初步退役计划。

65. 正在采取措施解决核科学、工业和国防技术开发早期阶段累积的遗留放射性废物问题。1996 年设立的原子能机构专家联络组已证明属于交流信息和协调俄罗斯联邦核遗产计划的一个高效论坛。2010 年底，在支付了该计划近三分之一资金的国际伙伴的重要帮助之下，俄罗斯联邦对 191 艘已退役的核潜艇进行了燃料拆卸和拆除工作。目前正在拆卸四艘潜艇，预计到 2012 年底前将拆除五艘潜艇。潜艇反应堆装置一般包括两座已拆卸燃料的反应堆，目前正在对其进行密封并将其置于一个长期贮存设施中。两个地区性放射性废物整备和长期贮存中心正在建设之中。此外，还正在实施回收沿俄罗斯海岸航行用强放射性同位素热电发生器的联合计划，870 个放射性同位素热电发生器中的大多数已经回收，仅剩下 248 个尚未回收。

A.4. 安全性⁶

66. 由核电营运者联合会公布的并复载于图 A-3 和图 A-4 中的安全指标在 20 世纪 90 年代有了明显改进。最近几年中，大多数领域情况保持稳定，并在 2009 年取得了进一步的改进。但业绩最佳者与最差者之间的差距仍然很大，为继续改进提供了相当大的空间。《2010 年核安全评论》更详尽地介绍了到 2010 年底与所有核应用活动有关的安全信息和最新发展。

⁶ 有关原子能机构核安全活动的更详细资料，可见最新的“年度报告”（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2010/>）相关部分和 <http://www-ns.iaea.org/>。

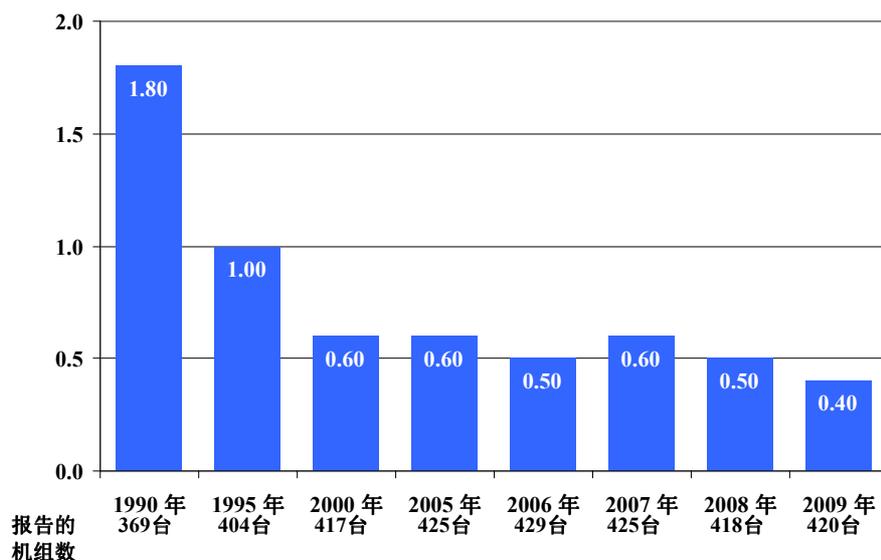


图 A-3. 每 7000 小时临界非计划自动停堆次数 (来源: 核电营运者联合会 2009 年实绩指标)。

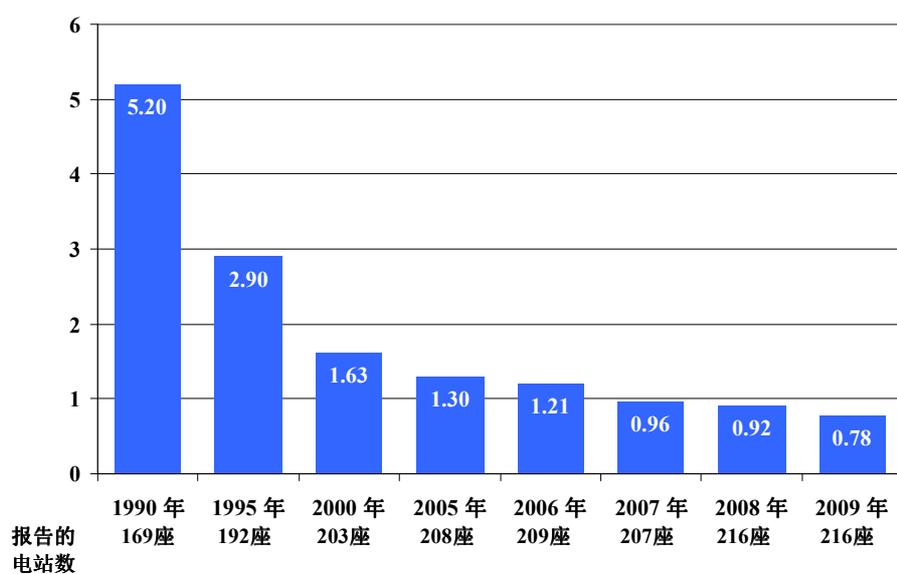


图 A-4. 核电厂每 100 万人·工作小时的工业安全事故率 (来源: 核电营运者联合会 2009 年实绩指标)。说明: 这些事件不一定是放射性事件。

B. 先进的裂变和聚变

B.1. 先进的裂变⁷

B.1.1. 水冷堆⁸

67. 在中小型反应堆领域，阿根廷已开始准备建造一座基于“CAREM 概念”的 25 兆瓦（电）原型动力堆。预计该反应堆将在本十年中叶前开始运行。正在进行一个 150 兆瓦（电）装置建造工作的预可行性研究。

68. 2010 年，中国开工建造八座新反应堆。这些反应堆包括基于现有在运电厂技术的 610 兆瓦（电）和 1000 兆瓦（电）渐进型压水堆以及更新型的 AP-1000 设计和欧洲压水堆设计。中国目前正在开发 CAP-1400 和 CAP-1700 设计，它们是更大的 AP-1000 设计。同时，中国正在投资进行中国超临界水冷堆的设计研究。

69. 在法国，阿雷瓦集团公司继续进行 1600+ 兆瓦（电）压水堆的营销，推动它们的国内和国际应用。阿雷瓦集团公司还在与日本三菱重工合作开发 1100+ 兆瓦（电）ATMEA 压水堆，以及与德国意昂集团公司合作开发 1250+ 兆瓦（电）KERENA 沸水堆。

70. 2010 年，日本开工建造一座新的先进沸水堆。日立公司正在进行 600 兆瓦（电）、900 兆瓦（电）和 1700 兆瓦（电）先进沸水堆以及 1700 兆瓦（电）先进沸水堆 II 型的开发。三菱重工为美国市场开发了 1700 兆瓦（电）先进压水堆，即美国先进压水堆，其目前正处于美国核管会的设计认证过程。欧洲型先进压水堆即欧洲先进压水堆也在开发之中，并将按照欧洲电力公司要求进行评定。此外，日本还在进行革新型超临界水冷堆设计的开发。

71. 一座自主开发的新 OPR-1000 于 2010 年在大韩民国并入电网。在阿拉伯联合酋长国，第一座先进动力堆即 APR-1400 的建造正在如期推进，并在 2009 年底授予了另外建造四座 APR-1400 的合同。大韩民国正在开发欧洲型的 APR-1400 即 EU-APR-1400，并将按照欧洲电力公司要求对其进行评定。大韩民国还在开发美国型的 APR-1400 即 US-APR-1400，并将其提交美国核管会进行设计认证。与此同时，2010 年继续进行 1500 兆瓦（电）APR+ 的开发，并宣布启动 APR-1000 的设计。在中小型反应堆领域，大韩民国加强了开发 330 兆瓦（热）SMART 型一体化压水堆的努力。

72. 俄罗斯联邦在 2010 年开始增建两座反应堆，其中包括一座 WWER-1200。还宣布了开发 WWER-1200A 以及基于当前 WWER-1200 设计的 WWER-600 和 WWER-1800 的计划。此外，俄罗斯联邦还在进行有关革新型 WWER-SC 超临界水冷堆的工作，并

⁷ 有关原子能机构先进裂变堆活动的更详细资料可见最新“年度报告”的相关部分 (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2010/>)。

⁸ 有关本部分中所述所有先进堆设计的详细技术资料可见 <http://aris.iaea.org> 网站“原子能机构先进反应堆信息系统”部分。

正在继续进行用于专门用途的浮动式小型反应堆 KLT 40S 的建造。

73. 在美国，美国核管会正在进行五座先进水冷堆设计即 AP-1000、US-APWR、US-EPR、西屋公司中小型反应堆和经济简化型沸水堆的设计认证过程。美国核管会正在审查 AP-1000 经修订的设施认证，AP-1000 于 2006 年获得设计认证。经济简化型沸水堆是该系列中第一个获得核准的反应堆（2010 年 10 月）。此外，预计 US-APR1400、巴布科克·威尔科克斯公司的 125 兆瓦（电）mPower 型一体化压水堆和 NuScale 电力公司的 45 兆瓦（电）一体化压水堆也将在近期提交美国核管会进行设计认证。

74. 在加拿大，加拿大核安全委员会 2010 年完成了对 700 兆瓦（电）增强型坎杜堆-6 设计进行项目前设计审查的第一阶段，这种第三代设计纳入了根据坎杜堆-9 的设计以及近期在中国和大韩民国所建造的坎杜堆-6 机组方面取得的经验进行的若干创新。目前正在进行的增强型坎杜堆-6 项目前设计审查的第二阶段将于 2012 年初完成。加拿大原子能有限公司还继续开发先进坎杜堆（ACR-1000），这种第三代+的设计采用了非常高的部件标准化和稍加浓铀，以便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先进坎杜堆（ACR-1000）项目前设计审查的第三阶段，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三个阶段的首个先进核动力反应堆。加拿大原子能有限公司还正在积极开发一种坎杜超临界水堆，这种第四代设计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。

75. 在印度，一座新的 220 兆瓦（电）加压重水堆在 2010 并入电网。印度目前正在向小电网国家销售这种反应堆，以推动它的建造。另有六座反应堆正在建造之中，其中包括一座 220 兆瓦（电）加压重水堆、两座渐进型 700 兆瓦（电）加压重水堆、两座 WWER-1000 反应堆和一座 500 兆瓦（电）原型快中子增殖堆。印度核电有限公司开发了渐进型 700 兆瓦（电）加压重水堆。2010 年发起实施了涉及八个这种 700 兆瓦（电）加压重水堆机组的四个项目。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，该重水堆将使用钍，利用重水慢化，并在垂直压力管中盛装沸轻水冷却剂和安装非能动安全系统。

B.1.2. 快中子系统

76. 在中国，65 兆瓦（热）（20 兆瓦（电））池式中国实验快堆在 2010 年 7 月 21 日首次达到临界。中国实验快堆的物理启动程序目前正在制订之中。

77. 印度卡尔帕卡姆 500 兆瓦（电）原型快中子增殖堆的建设工程正在顺利进行：安全容器、主容器和内部容器已安装完成。反应堆厂房已经完工。该增殖堆计划于 2012 年末至 2013 年初进行调试。

78. 日本在 2010 年 5 月重新启动了 280 兆瓦（电）原型快中子增殖堆。现已开始进行确认性测试。

79. 在俄罗斯联邦，别洛雅尔斯克 BN-800 快堆的建造正在不断取得进展。几乎所有部件都已订购，并且它们的制造工作正在顺利进行。该快堆计划于 2013 年进行调试。

80. 比利时在欧原联的框架内成立了一个团队，由其进行次临界实验快堆 MYRRHA（高技术利用多用途混合研究堆）的设计工作。2010 年，比利时政府为直到 2014 年这段时间拨款 6000 万欧元，以便为 MYRRHA 项目第一阶段提供资金。该项目得到了原能联、欧洲委员会、欧洲研究基础设施战略论坛和“欧洲可持续核工业倡议”的支持，估计项目总费用为 9.6 亿欧元。为了试验次临界度监测情况，已经建造了一座实验设施 GUINEVERE，并配置了一台连续氦加速器。该加速器装备有安装在铅冷、快中子次临界增殖系统中的钍-铀靶。GUINEVERE 定于 2011 年投入运行。

B.1.3. 气冷堆

81. 在中国，高温气冷示范堆的实施计划已得到政府批准。项目许可证正在审查之中，首罐混凝土灌注预期于 2011 年进行。

82. 在被视为进行高温气冷堆建造的牵头国的南非，由于除其他外，特别是全球金融危机后财政制约的结果，球床模块式反应堆计划在 2010 年被叫停。该项目已被置于“看护和维护计划”之下，以保护知识产权和资产，直至政府就进一步的计划作出决定。

83. 在日本，完成了对高温工程试验堆的更苛刻试验，试验期共计 90 天，其中有 50 天温度处于 950°C 下。日本政府目前正在调查将高温工程试验堆与氢生产系统相连接以便进行小规模氢生产的可行性。

84. 美国继续在爱达荷国家实验室先进试验堆上进行以长辐照期燃料破损率作为测量指标的三层各向同性燃料安全试验。2010 年年中开始了第一次燃料试验（AGR-1）的辐照后检验工作，以及在先进试验堆上进行第二次燃料试验（AGR-2）。下一代核电站项目已稍作推迟，并于 2011 年初完成了概念设计研究。总体而言，下一代核电站侧重于产生反应堆出口温度大于 750°C 的高温工艺热应用。2011 年，工作的重点将是建立一种公私伙伴关系，以便开始示范堆的设计、许可证审批和建造。

85. 大韩民国在过去六年中一直在投资建造若干试验设施，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，若干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。已定于在 2015 年之前进行反应堆概念的选择，届时，其他系统试验大多将已完成。“核能产氢开发和示范项目”在目前得到了工业界和政府的大力支持。

B.1.4. “革新型核反应堆和燃料循环国际项目”和“第四代国际论坛”

86. 支持成员国开发和部署可持续核能系统的“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”于 2010 年庆祝其实施 10 周年，并对新成员波兰表示欢迎，该国的加入已使其成员总数增加到 32 个。革新型核反应堆和燃料循环国际项目对话论坛在 2010 年举办了两次，对来自所有核发展阶段的利益相关者之间正在就各种广泛的专题进行的讨论提供了支持。分别由白俄罗斯和哈萨克斯坦进行的两项核能系统评定正在进行，原子能机构出版物《革新型核反应堆和燃料循环国际项目方法学在核能系统评定中的应用介

绍》已作为成员国核能系统评定支助包的一部分印发。2010 年完成了两个协作项目，即“抗扩散性：获取/转用途分析”和“铀-233/钍燃料循环的进一步研究”。为了响应成员国对联合模拟全球和地区核电部署趋势的日增兴趣，关于“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的总体结构”的协作项目继续其从当前核能系统到未来核能系统过渡战略的方法学模拟研究。

87. “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了各种反应堆、能量转换和燃料循环技术。它们的设计特点是热中子和快中子范围、闭合燃料循环和开式燃料循环以及从很小到很大的一系列广泛的反应堆规模。取决于各自的技术成熟度，预计第四代系统将在 2015 年至 2030 年期间或此后可用于投入商业使用。“第四代国际论坛”目前有 13 个成员⁹。

88. 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、钍和燃料循环的影响等其他专题。2010 年，原子能机构/“第四代国际论坛”的一个讲习班重点涉及了钠冷快堆的运行安全问题，并提高了对钠冷快堆安全问题的认识。

B.2. 聚变

89. 在 2010 年 7 月举行的国际热核实验堆理事会特别会议上，与会各方就国际热核实验堆装置和设施的基准设计特点达成了一致意见。自那时起，国际热核实验堆正式从设计审查阶段进入建造阶段。根据经修订的进度表，将于 2019 年 11 月产生第一束等离子体，于 2027 年 3 月开始氘-氚运行，最终将使国际热核实验堆达到 500 兆瓦的输出功率。

90. 美国劳伦斯·利弗莫尔实验室的“国家点火装置”自 2009 年 5 月举行落成仪式以来取得了显著进展。2010 年 1 月实现了 1 兆焦耳脉冲，2010 年 9 月开始利用充分运行的整套探测器进行综合点火实验。这些实验包括天体物理学、核物理学、辐射输运、材料动力学和流体力学等领域的高能量密度基础科学研究。

91. 两台新的中型超导托卡马克装置即大韩民国的韩国超导托卡马克先进研究装置（图 B-1）和中国的先进超导托卡马克实验装置现已投入全面运行。国际热核实验堆的这些长脉冲相关实验旨在调查国际热核实验堆与稳态运行有关的相关问题。这两个实验都已开始利用额外等离子体加热进行高功率运行。韩国超导托卡马克先进研究装置的所在地韩国国家聚变研究所在 2010 年 10 月主办了“第二十三届国际原子能机构聚变能会议”，会上报告了关于所有主要聚变等离子体实验的最新进展情况。

⁹ 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。



图 B-1. 大韩民国大田韩国国家聚变研究所的韩国超导托卡马克先进研究装置。

C. 原子数据和核数据

92. 由原子能机构协调并由核反应数据中心国际网和核结构和衰变数据编评者国际网开发的主要核数据库继续得到改进。2010 年特别值得注意的是，网络检索系统得到了加强，可以不同格式包括图形可视化提供核反应堆数据及其协方差。

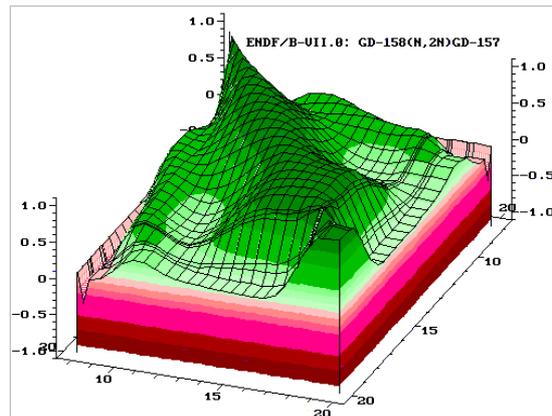


图 C-1. 核反应截面能量-能量相关性三维图。

93. 国际聚变材料辐照设施是目前正在开发中的一个国际项目，目的是测试将在 DEMO 示范堆或商用聚变动力堆中使用的材料。最近，西班牙启动了一个称为“工艺聚变”（TechnoFusión）的国家项目，以期为国际聚变材料辐照设施和 DEMO 示范堆提供技术支持，通过轻离子和重离子来模拟材料极端损坏情况。为了给这些设施和其他聚变设施提供核数据，有必要对核聚变编评数据库 2.1 版进行实质性扩展，以包括更高的能量以及入射带电粒子和相关不确定性评价。

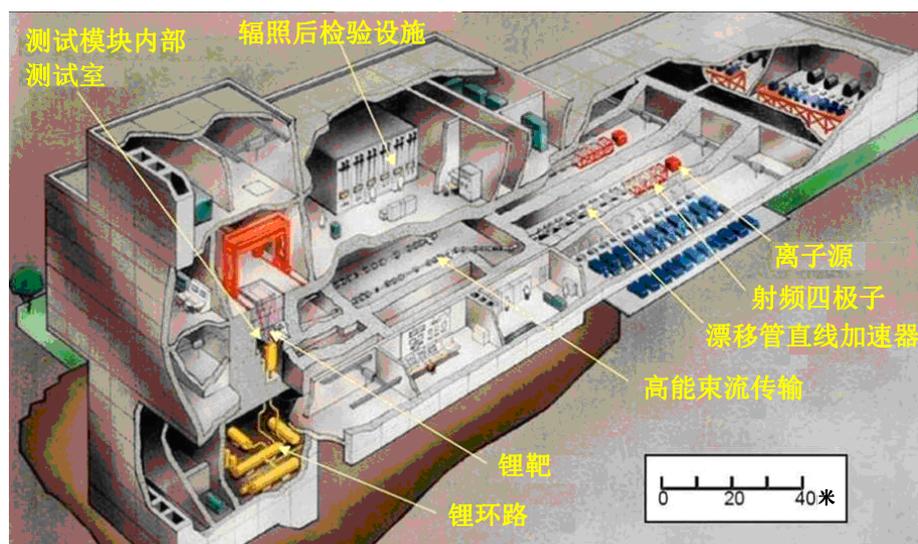


图 C-2. 国际聚变材料辐照设施的概念设计。

94. 2010 年，在大韩民国举行了三年一度的核数据用于科学技术国际会议，这次会议聚集了参与聚变和聚变能、加速器技术、剂量测定和屏蔽、天体物理学和其他相关领域核数据生产或应用工作的数百名科学家和工程师。这次会议涵盖了理论模型开发以及数据测量、评价、加工、验证和传播活动，为改进核数据作出了重大贡献。

95. 虚拟原子和分子数据中心是由《欧洲联盟研究和技术发展第七个框架计划》提供资金的一个为期三年半的项目，目的是为约 20 多个原子和分子数据库提供一个统一界面。该项目于 2010 年举行了第一次年会。“原子、分子和固体的可扩展标识语言计划”是确保互操作性的一个关键因素，该计划的开发工作由原子能机构进行协调。

96. 2009 年 4 月开始运行的直线加速器相干光源 X 射线自由电子激光装置在 2010 年取得了很大成功，正在以过去不可企及的方式生产实验原子数据。直线加速器相干光源的峰值亮度超过了先前自由电子激光峰值亮度的 2—3 个数量级，使得它可能在超新星爆炸、恒星内部和激光产生等离子体存在的那些条件等状况下对物质进行研究。



图 C-3. 直线加速器相干光源 X 射线自由电子激光装置。

D. 加速器和研究堆的应用

D.1. 加速器

97. 加速器技术的进步造就了发展适合于研究新型抗辐射材料制造技术分析方法的机会。

98. 2010 年，比利时的一个旨在为各种研究与发展应用提供质子和中子的加速器驱动系统在次临界实验快堆“MYRRHA”项目下获得财政资助。除其他外，将特别利用与次临界快堆堆芯耦合的质子加速器支持开展废物嬗变领域新的研究与发展活动。从 2022 年起，“MYRRHA”将为核技术、医学应用、核工业和可再生能源领域的革新型解决方案的发展做出贡献。

99. 基于 X 射线的技术已成为从医学到工程的许多领域主要的光谱测定和成像工具。在过去的两年中，同步加速器 X 射线源的 X 射线束聚焦、样本处理和测量自动化方面的进步拓展了其为与艾滋病毒感染、癌症病因、神经系统功能和细胞信号发送、光能合成等有关的研究提供支持的应用范围。例如，日本 SPring-8 设施的研究人员开发了一种光收集技术，致使能够产生直径 7 纳米的高亮度 X 射线束。这可能会导致开发出可用于直接观察分子和原子结构的纳米级分辨率 X 射线显微镜。下一代 X 射线源技术如能量回收型直线加速器（美国康奈尔大学）和世界各地若干 X 射线自由电子激光设施的竣工为研究极端条件下的原子和电子行为开辟了新的机遇。

100. 2010 年在欧洲同步加速器设施成功实施的高分辨率硬 X 射线同步加速器辐射显微断层照相技术是目前惟一能够提供三维信息以支持核聚变反应堆新材料研究的方法。

101. 在环境监测研究中，来自莱斯特大学和英国地质调查局的科学家们利用钻石光源研究了从铀加工厂四周收集的尘埃和土壤颗粒的化学形成过程、生物可接近性和移动性。

102. 2010 年，来自法国博物馆研究与恢复中心实验室和欧洲同步加速器设施的科学家们首次利用定量化学 X 射线荧光技术直接对分布在卢浮宫博物馆各展厅的七幅油画（包括蒙娜丽莎油画）进行了现场非侵入表征。2010 年 7 月公布的结果对确定和研究早期绘画大师采用的技术如列奥纳多·达芬奇使用的著名的“层次渲染法”起到了帮助作用。

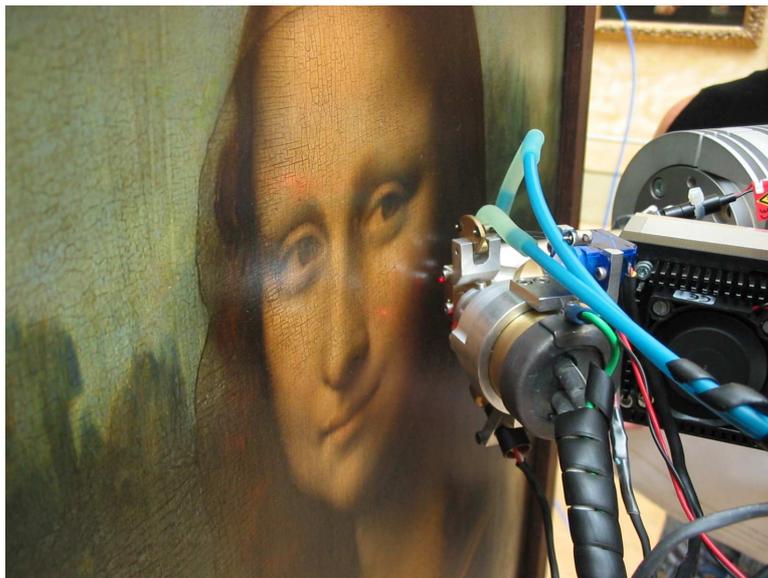


图 D-1. X 射线荧光技术用于对法国卢浮宫博物馆的蒙娜丽莎油画（法国博物馆研究与恢复中心实验室提供，版权所有© C2RMF）进行现场非侵入表征。

D.2. 研究堆

103. 目前有 20 多个成员国正在考虑建设新研究堆，许多国家都是将其作为与核技术的其他和平应用并行的国家核电引进计划的首个步骤。在约旦，第一座 5 兆瓦多用途研究堆的开发工作处在后期设计阶段，建造工作即将展开。阿根廷和巴西在双边合作计划框架内缔结了关于在两国分别开发和建造具有先进设计和大量放射性同位素生产能力的研究堆的协议。

104. 根据原子能机构“研究堆数据库”¹⁰的资料，在 2010 年底，全世界共有 249 座研究堆：其中运行中的研究堆有 237 座，12 座已暂时关闭。另有 5 座正在建造或已列入计划。2010 年只有中国先进研究堆和中国实验快堆这两座研究堆进行了调试，这两座反应堆都位于北京附近的中国原子能科学研究院。中国先进研究堆于 2010 年 5 月 13 日首次达到临界，中国实验快堆则于 2010 年 7 月 21 日首次达到临界。

¹⁰ <http://nucleus.iaea.org/RRDB/>。



图 D-2. 中国先进研究堆。

105. 随着老旧研究堆退休并被数量更少但用途更多的反应堆所取代，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。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，除东欧、加勒比、中亚、波罗的海和地中海地区现有的五个研究堆联盟外，已设想建立新的联盟和网络，以加强研究堆的运行和利用，并使这些反应堆变得切实可行。

106. 美国的“减少全球威胁倡议”继续开展努力将研究堆燃料和同位素生产设施所用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 200 座。到 2010 年底，全世界有 72 座一直使用高浓铀燃料运行的研究堆已转换为使用低浓铀燃料或在 30 多年的国际合作转换努力过程中在转换前被关闭。其中，自该计划在 2004 年加强活动以来有 33 座研究堆进行了转换。

107. 原子能机构继续向将研究堆燃料返还原产国的成员国和国际计划提供支助。作为俄罗斯研究堆燃料返还计划的一部分，根据原子能机构安排签署的合同从白俄罗斯、捷克共和国和乌克兰返还了五运次共计约 109 千克高浓铀新鲜燃料。原子能机构还协助从白俄罗斯、波兰、塞尔维亚（从温萨返还 13.2 千克）和乌克兰返还了约 376 千克高浓铀乏燃料。

108. 2010 年底，从塞尔维亚温萨向俄罗斯联邦运输了 2500 千克降质研究堆乏燃料，其中大多数是低浓铀燃料。原子能机构历史上这一价值最大的技术合作项目的成功实施标志着原子能机构以及为数众多的外部财政捐助者和技术支持组织的协作努力累积取得的成果。将继续进一步开展工作，以支持为使该设施完全退役所作的努力。

109. 南非继续在大规模生产商所需钼-99 生产用靶件从高浓铀向低浓铀转换和化学加工设备方面处于领先地位，并于 2010 年成为供应工业规模数量低浓铀钼-99 供出口的第

一主要生产商。俄罗斯联邦季米特洛夫格勒原子反应堆研究所也于 2010 年开始了大规模的钼-99 生产，并于 2010 年 12 月向国外伙伴交付了（满足所有要求的）第一批。产量预计在 2011 年 5 月底前达到每周 800 居里，2012 年项目第二阶段结束后达到每周 2500 居里。早在 2002 年，阿根廷就成功地转换了小规模钼-99 生产，并随后开发并向澳大利亚和埃及出口了该技术。澳大利亚也报告其提高基于低浓铀裂变的钼-99 产量的努力 2010 年取得稳步进展。

110. 技术上的挑战导致了反复性、持续性而且常常同时发生的研究堆关闭，从而促成了 2007 年后期开始出现的钼-99 供应危机进一步延长¹¹。在正进行计划和非计划长期停役的反应堆恢复服役之前，整个 2010 年期间为提高需求方效率、减少运输挑战和核准有能力的反应堆进行靶件辐照所作的全球范围的协调努力对于减轻这种危机的影响起到了极大的帮助作用。阿根廷国家原子能委员会将其钼-99 产出提高了一倍，从而确保了阿根廷的自给自足并帮助满足了该地区其他国家的需求。在比利时，摩尔核研究中心提高了其 BR-2 反应堆的高浓铀靶件辐照能力并完成一个额外的运行周期，同时位于弗勒吕斯的国家放射性元素研究所也提高了靶件处理能力。但经合组织核能机构在原子能机构提供输入的情况下于 2010 年 9 月发表的一份报告¹²的结论是，在所有有关技术、市场和政策方面的问题得到解决之前，钼-99 供应安全所面临的威胁将依然存在。

111. 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。过去几年已经在这方面取得了显著进展。国际燃料开发工作组正在协作研究铀-钼燃料的行为和性能。在美国，工作的重点是开发高通量研究堆所用的块状铀-钼燃料。随着制造技术的成熟，正在取得重要进步。欧洲在 2009 年整合了一项新倡议，目的是使超高密度低浓铀弥散性铀-钼燃料达到转换使用低浓铀燃料的欧洲高通量反应堆的要求。虽然 2010 年在铀-钼燃料的开发和认证方面取得了实质性进展，但还需要取得进一步的进展和进行重要的试验，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。

¹¹ 亦见关于放射性同位素和放射性药物的 I.1 节。

¹² <http://www.nea.fr/med-radio/reports/MO-99.pdf>。

E. 粮食和农业领域的核技术¹³

E.1. 改进牲畜的繁殖力和健康

112. 用于疾病早期诊断的快速和准确的核和核相关技术的开发、试验、验证和实施在提高粮食安全方面发挥了重要的作用。一个例子就是全球根除牛疫。预计联合国粮食及农业组织（粮农组织）和世界动物卫生组织（动物卫生组织）将在 2011 年正式宣布这一消息。然而，全世界仍面临着来自其他跨境动物疾病的挑战，其中一些疾病能够潜在地影响到人类。因此，必须快速、准确和最好在现场对这些疾病进行诊断并随后实施适当的控制措施。目前正在发展用于开发安全和有效的疫苗、稳定和放射性标记、敏感和特定病原体鉴定的示踪平台以及利用稳定同位素监测迁徙性动物的新辐照技术。

113. 在疫苗的病原体成分减弱或无传染性时，辐照疫苗保留着其刺激某种强免疫反应的能力。一些成员国在开发预防当前没有有效疫苗的一些跨境动物疾病的这类疫苗方面正在获得支持。例如，正在阿根廷和格鲁吉亚开发预防牛布氏杆菌病（一种广泛分布的动物传染疾病）的疫苗；在埃塞俄比亚、苏丹和斯里兰卡开发预防寄生虫感染的疫苗；在中国和土耳其开发预防泰勒虫病的疫苗；在印度和肯尼亚开发预防锥虫病的疫苗；在泰国开发预防边虫病的疫苗以及在伊朗伊斯兰共和国开发预防鱼源性寄生虫的疫苗。

114. 为了了解羊痘¹⁴ 疫苗有害副作用或疫苗失效的原因，已进行了若干地方菌株和疫苗菌株的全基因组测序，以确定可能作为原因的基因的存在或缺失情况。通过以应用磷-32 和硫-35 标记方式利用 DNA 微列阵技术研究绵羊和山羊基因组将提供对抗病性和参与牲畜疾病免疫反应的不同基因作用的更深入了解。这是了解家畜表型和基因型变异的一个重要步骤。

115. 2009 年和 2010 年期间，在利用钴-60 辐照开发山羊辐射杂交图（辐射杂交图 3）方面取得了重要进展。这项工作是与世界各地若干研究机构协作完成的，这些研究机构是法国国家农艺学研究院、美国德克萨斯州农工大学、中国华中农业大学和加拿大的 DNA 兰德马克公司。这将有助于确认可用于繁殖目的的具有经济性生产特性的遗传标记。

¹³ 可从 GovAtom 网站《2011 年核技术评论》的相关文件中获得更多资料。

¹⁴ 羊痘病毒引起山羊痘、绵羊痘和结节性皮炎。

E.2. 虫害防治

116. 在土地、种子、水、肥料、劳动力和其他输入方面进行的投入到头来却使农业产出部分或全部被虫害所破坏，这是对可用于供养不断增长的人口之有限资源的一种低效利用。因此，提高生产率和确保全球粮食安全的一个重要战略组成部分将是增加在虫害防治方面的投入。但是，当前对杀虫剂的依赖损害了自然平衡，在粮食上留下了残留物，并常常使害虫形成抗药性。其结果是，对效率更高、于环境更加友好和更具可持续性的虫害防治方案的需求不断增加。

117. 在虫害防治领域，对核技术的需求过去基本上限于大面积综合应用昆虫不育技术和相关遗传防治方法进行昆虫不育。然而，通过应用辐射提高引入和释放自然天敌（拟寄生物和捕食者）的成本效益和安全性可为生物防治虫害提供很大的潜力。



图 E-1. 拟寄生物雌虫用其长长的产卵器刺入水果，以便将卵注入宿主体内。

118. 来自 15 个国家的 18 个研究小组在 2010 年结束的粮农组织/原子能机构一个协调研究项目下研究了与不同的生物防治物生产和操作系统有关的各种限制因素，包括在生物防治物运输期间伴生的有害生物的可能存在。研究表明，存在着许多 γ 射线或 X 射线等电离辐射在其中能够对实施生物防治起到增值作用的创新方式，如增加自然天敌或宿主的保存期以及在能够将拟寄生物和非寄生成虫运送给客户之前减少对其的保存和分离的费用和后勤问题等。

119. 另外，还可以应用辐射对用于在野外部署的宿主或被掠食者进行部分或完全灭菌处理，以便在季节性害虫种群增加之前提高天然或释放的生物防治物的初期存活率及早积累。应用辐射还能够有助于减少与引入外来生物防治物有关的风险，外来生物防治物若未经半自然或自然条件下的仔细甄选，则会成为非目标生物的害虫。可以在没有任何建设风险的野外条件下对已灭菌的生物防治物进行宿主专一性检验。

120. 辐射通过抑制天然或人为宿主的防御反应还是用于研究宿主免疫反应等宿主-拟寄生物生理学相互作用的一种非常有用的手段。最后，将天敌与不育昆虫释放整合纳入大面积综合虫害防治计划的可行性已得到证明。



图 E-2. 拟寄生物雌虫将卵产在含有宿主幼虫的人工饲料中，作为规模饲养过程的一部分。

121. 这些核应用中的一些应用已经在进行大规模的实施，例如在巴基斯坦，目前正在那里部署生物防治物，以防治棉花和甘蔗作物的主要害虫。¹⁵

E.3. 作物改良

122. 世界银行在 2009 年估算，发展中国家将承受 70—80% 的气候变化损害代价，而农业是受影响最严重的领域。气候变化对农业的主要影响将可能是更高的温度多变性、降雨模式改变，包括极端事件（洪水和干旱）发生的强度和频度的增加以及海平面上升并从而影响存在大量耕地的沿海地区（这些耕地会受到盐水浸入的严重影响）所致。

123. 一种可能的应对措施是作物的遗传改良。人们一直在成功地利用植物遗传物质的突变或自然发生的可遗传变化来确定和选择对作物改良至关重要的特性。用于突变诱发的核技术能够提高遗传变化的速率，并因此通过以下方式增加作物对气候变化和多变性的适应性：

- 根据产量和产量构成因素，开发现有变异种群的遗传多样性，以评定对气候变化相关恶劣条件的耐受性；

¹⁵ 所有这些应用都刊登在《生物科学和技术》同行评审杂志的一份 362 页的专刊中。请参阅：http://www-naweb.iaea.org/nafa/ipc/crp/Biocontrol_final.pdf。

- 通过应用稳定同位素技术，用现有手段来表征对这些恶劣条件的生理学和生物化学响应情况；
- 利用各种分子工具分析和开发突变体，以及利用相关的生物信息学工具评价大型数据集并将受恶劣条件和（或）基因型影响的代谢途径可视化。



图 E-3. 开发辐射诱发突变体以改良作物和加强对基因功能的了解。不同的颜色对应于不同的突变体。这些都是晚期突变体，将储藏起来待以后针对特定的恶劣条件进行筛选以选取阳性突变体（图片由中国 D. Shu 先生提供）。

124. 若干成员国已将准备进行表型和分子表征的主要粮食作物种群进行了突变处理。为了提高核突变诱发技术的效率，今后的努力将涉及采用最先进的技术和表征现有突变种群，从而拓宽作物对气候变化和多变性的适应性。这些新的提高效率的技术包括：高通量焦磷酸测序法或对于业已获得近亲序列的基因组的直接深度测序，以及利用聚合酶链反应和荧光嵌入染料探测具有大内含子的基因中罕见突变的高分辨率溶解曲线分析。利用荧光监测系统能够探测单碱基错配，而这可以被认为是确定植物中单核苷酸多态性的一种扩展。DNA 测序费用的陡降使这些方法获得了进一步支持，并使得基因组区段可以进行过量采样，从而有助于消除误差和加速像具有混合诱变种群的小麦这样多倍体物种中的突变发现。气候变化可能导致栽培物种范围内遗传多样性的大量丧失。预测和模拟气候变化效应的复杂模型目前已可以利用，并可以针对目标地区的选定作物实现客制化，这被称作生物信息学。通过多边文书获得对全世界基因银行中基因组数据库和作物种质为应对粮食和农业所面临的这些关键挑战提供了有益的手段。

125. 基于突变诱发及增效生物技术的一揽子核技术能够有助于确定和开发适应气候变化和多变性的重要特性。这些技术能够推广到在气候稳定方面同样起到至关重要作用的森林。

E.4. 土壤和水管理

E.4.1. 评定农田中土壤碳整合的新前沿

126. 土壤有机碳是为作物生长提供基本营养、增强抗土壤侵蚀的恢复力和改善水保持的土壤有机物的一个重要组成部分。增加土壤有机碳的贮存（亦称为碳整合）有助于抵消耕作和畜牧生产等农业活动产生的二氧化碳排放，同时提高土壤质量和水保持力并减少营养损失。土壤碳整合是通过植物生物量输入土壤的碳与通过微生物活动和有机残留物分解以二氧化碳形式从土壤中释放的碳之间的平衡。量化从土壤中释放二氧化碳的程度和鉴别其来源能够有助于确定对影响二氧化碳释放的土壤过程起作用的管理因素。

127. 利用从土壤中释放的二氧化碳中的碳稳定同位素（碳-13 和碳-12）评定有机物动力学、碳整合潜力和土壤中碳的稳定性。但是，2010 年开展的研究（Phillips 等，2010 年）¹⁶ 表明，碳-13 的点测量受到给定场所的土壤和大气状况及测量时间的影响。通过对碳-13 进行持续和实时测量能够解决与场所和时间有关的碳-13 值的不确定性问题。已开发出利用高分析敏感度近红外激光的气体分析仪（Nickerson 和 Risk，2009 年）¹⁷ 来测量大气二氧化碳中的碳-13 和碳-12。这些便携式分析仪不需要频繁校准，而且能够在野外部署。有了这种精确度和坚固性，这些分析仪可提供对跨不同时空范围的农用地中土壤碳过程的更准确量化，从而在评定农田中土壤碳整合方面开辟了新的前沿。



图 E-4. 改善土质和加强土地的碳整合能力：巴西采取养护性农业方法种植的大豆（巴西农业研究公司 Bruno Alves 提供）。

¹⁶ Phillips, C.L., Nickerson, N., Risk, D., Kayler, Z.E., Andersen, C., Mix, A., Bond, B., 2010 年，“土壤湿度对土壤呼吸的碳同位素组成的影响”。《质谱学快讯》第 24 期，第 1271—1280 页。

¹⁷ Nickerson, N.和 Risk, D., 2009 年，“土壤呼吸二氧化碳同位素组分的物理控制”。《地球物理学研究杂志 — 生物地球科学》，114, G01016, doi: 10.1029/2008JG000844。

E.4.2. 利用磷酸盐的氧同位素示踪磷的来源和在土壤中的循环

128. 磷是植物、人类和动物营养中的一个基本元素。鉴于世界上有许多地区存在着低磷含量的土壤以及缺磷问题限制了植物生长并降低了作物产量和粮食质量，因此，必须对磷的动力学有更好的了解。磷有一个稳定同位素（磷-31）和若干放射性同位素（从磷-26 到磷-30 和从磷-32 到磷-38），但适合进行农艺研究的仅有的两个同位素（磷-32 和磷-33）的半衰期都非常短，分别为 14.3 天和 25.3 天，这使得难以开展任何长期研究。由于磷只有一个稳定同位素，研究人员已开始探索无机磷和有机磷化合物中氧同位素的潜力，以期研究和了解耕作和畜牧生产体系中的磷动力学问题，从而提高土壤肥力和粮食生产率。这种信息对于今后促进农业生产可持续集约化的磷管理和最大程度减少过量磷对环境的不利影响都非常重要。

129. 为了对来自不同土壤磷组分的土壤中的氧-18 进行分析，必须将磷从土壤中提取出来、纯化和转化为正磷酸银。一个科学家小组¹⁸ 于最近开发出对不同国家具有不同土壤磷状态和植物可利用率的土壤进行氧-18 估算的方案。处于不同农田管理实践（如施用化肥或粪肥）下的土壤表现出土壤磷中具有不同的氧-18 特征，从而表明了氧-18 作为一种同位素示踪剂用以研究磷循环、追踪磷来源并最终提供对农业生态系统中土壤磷动力学的更好了解的潜力。

F. 人体健康

F.1. 营养学

130. 基于氘稀释法的稳定同位素技术是评定人体成分和母乳喂养婴儿人奶摄入量的重要工具。最近几年中，在原子能机构的支助下，这些技术已从主要由工业化国家的少数杰出中心掌握的纯研究工具发展成为发展中国家用来评价公众健康营养干预的工具。为促进这一变化，重点采用了便于使用的光谱技术，利用这种技术进行含水样品中氘富集度的分析。霍氏转换红外光谱技术是一种简单易学和价格相对低廉的技术，而且几乎不需要进行仪器维护。因此，该技术非常适合资源有限的发展中国家使用。在原子能机构的支助下，非洲和拉丁美洲在过去几年中建立起了显著的能力，它们目前利用采用霍氏转换红外光谱技术分析唾液中氘的稳定同位素技术进行营养学干预的评价，以便向保健专业人员和决策者提供充分的证据基础，供他们采取作为确保婴儿和儿童健康成长努力一部分的干预措施。

¹⁸ Tamburini, F.、Bernasconi, S.M.、Angert, A.、Weiner, T.和 Frossard, E., 2010 年, “分析利用盐酸从土壤提取的无机磷中 $\delta^{18}\text{O}$ 的方法”。《欧洲土壤科学杂志》，第 61 卷第 6 期，第 1025—1032 页。

F.2. 辐射肿瘤学应用领域的进步¹⁹

131. 三维适形放射治疗被用于确定基于三维图像数据的放射治疗规划的设计和和实施，这种治疗能够单个地确定治疗区的形状，从而仅对靶组织实施治疗。通过使用三维适形辐射治疗，并经过或不经过强度调制，现已能够将规定的辐射剂量与肿瘤形状相匹配，从而更好地保护健康的邻近组织。

132. 辐射肿瘤学家面临着人体一些部位上的器官和肿瘤在治疗过程中移动的特别问题。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。这种情况对随呼吸移动的胸部肿瘤来说尤为显著。位于喉部、腹部（肝）、前列腺和膀胱以及整个骨盆上的肿瘤同样存在这种情形，因为这些肿瘤也会在实施治疗过程中或前后治疗之间发生移动。

133. 通过发展呼吸门控放射治疗，现已能够非常精确地考虑到肿瘤移动。在进行由计算机驱动的呼吸门控放射治疗时，一个带有反光标记的小塑料盒被放置在患者的腹部。反光标记随着呼吸移动，一台连接到中央处理单元的数码照相机则对这些移动实施实时监测。计算机程序对移动作出分析，并在发生呼吸循环的同一时刻触发治疗束。利用这一技术，还可选择呼吸时相。视肿瘤的位置，选择是在吸气期间还是呼气期间对肿瘤进行辐照。因此，肿瘤始终都被辐射束所覆盖，同时避免了对关键器官的照射。

F.3. 核医学技术在心脏病学研究方面的新发展

134. 在过去的三年中，核医学取得了重大进步，尤其是在心脏病学领域。对患者的扫描时间和施用的辐射剂量都已减少，同时提高了总体成像质量，这使得能够更自信和更高效地进行心血管疾病的诊断，并改进了工作流程。

135. 单光子发射计算机断层照相法成像中使用的常规“安格” γ 射线照相机系统的技术概念在过去50年中一直没有变化。该传统设计使用掺杂铊的碘酸钠晶体，这种晶体响应 γ 射线光子发生闪烁，产生微弱闪光。设计中还配有一套光电倍增管，用于探测这种荧光闪光。而新技术将新的探测器材料如碲锌镉、聚焦针孔准直的使用、三维重建和数据获取模型结合在了一起。在传统的“安格”照相机中， γ 射线撞击碘化钠闪烁晶体，产生闪光，然后，光电倍增管将光子转变为电荷，从而完成这一两步骤程序。采用静态探测器， γ 射线撞击一种不同类型的晶体，如碲锌镉，它是一种半导体，可将光子直接转变为数字电子信号，一个步骤即完成程序。

136. 这一新型高速系统的特点是计数灵敏度提高，从而减少了研究时间和施用的辐射剂量，而又不损害研究质量和诊断能力。采用新系统，有效辐射剂量与使用常规核医学技术施用的剂量相比减少到了十分之一的范围。

137. 扫描时间减少至四分钟的应力/两分钟的静息获取，同时，高速照相机提供的图像

¹⁹ 可从 GovAtom 网站《2011 年核技术评论》的相关文件中获得更多资料。

分辨率提高，而灌注异常量与传统单光子发射计算机断层照相法获得的心肌灌注图像的灌注异常量相近（图 F-1.）²⁰。

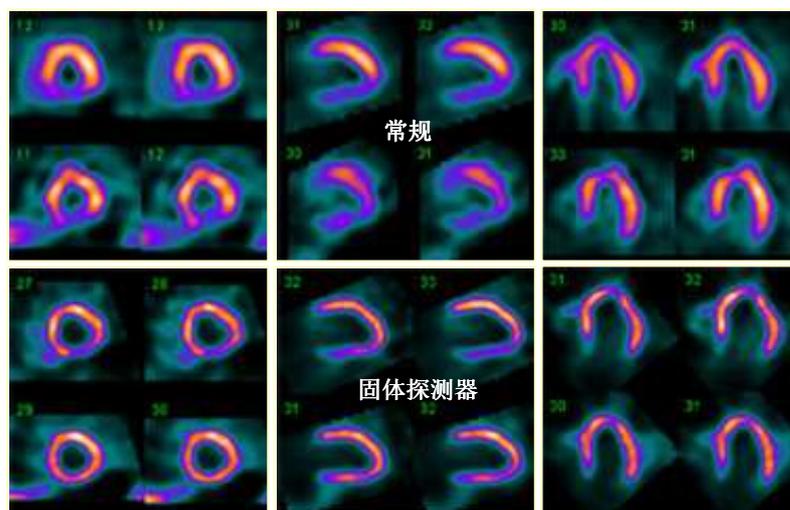


图 F-1. 使用常规单光子发射计算机断层照相技术获得的心肌灌注图像（上排）和使用配备固体碲锌镉探测器的新型专用心脏照相机获得的心肌灌注图像（下排）。对同一患者依次进行了这两种研究。可非常容易地看出图像分辨率上的差别（图片由英国伦敦大学学院附属医院B. Hutton教授和S. Ben-Haim教授提供）。

138. 新系统使得有可能将分子核医学图像与计算机断层照相设备提供的解剖细节结合在一起。将这两种不同类型的设备合并成“混合系统”后，可在一个单一的诊断程序中对功能和结构进行综合评价，以最大地受益于每一种方式。这是目前正在核心脏病学领域得到应用的患者护理方面的一大改进，它今后肯定会在其他临床领域如肿瘤学领域得到更加广泛的应用。

G. 环境

G.1. 利用核技术进行海洋有害藻华的早期预警

139. 海洋有害藻华是显微藻类的生长和积聚造成的，而这些生长和积聚主要是人类活动的结果。贝类将有毒浮游植物群落从海水中过滤出来作为食物，继而使藻类毒素积聚到可对人类或其他消费者致命的水平。除了各国报告的死亡案例以及中毒和毒性效应案例外，联合国环境规划署“保护海洋环境免受陆基活动影响全球行动计划”在2002年报告说，有害藻华造成了总计达数亿美元的巨大经济损失。

²⁰ Tali Sharir（医学博士）、Piotr J. Slomka 和 Daniel S. Berman（医学博士）：静态单光子发射计算机断层照相技术：快速高效。J Nucl Cardiol 2010； 17:890-6。

140. 在美国以及欧盟，装载贝类的所有容器和所有货物都必须带有标明产地、捕捞者和捕捞日期的标签和卫生证明书。在贝类的运输、加工和分销直到零售的整个过程中都必须具备这些资料，以便能够在出现卫生问题时对产品进行追踪。2010年，欧洲联盟和美国开始研究提供无有害藻华毒素贝类证书的要求，此事仍在审议之中。如果通过这项立法，今后会禁止所有无此类证书高价贝类的进口。2009年，欧洲食品安全局食品链中污染物问题小组指出，“当前的鼠生物分析法被认为不是用于控制目的的适当工具。”在2010年国际AOAC分析化学家协会（追求卓越分析科学协会）年会上，基于利用放射性标记毒素的核技术“受体结合分析法”被确定为已经预验证研究成功试验的两个先进替代方法之一，它对贝类出口国家监管部门将具有重要意义。

141. 受体结合分析法还是一个强大的研究工具，能够更好地评定随水柱中的物理化学变化而变化的藻类毒素动态，这可有助于确定调节毒性的因素并有助于开发藻华毒性预测模型。在菲律宾的一个原子能机构协作中心，目前正在利用受体结合分析技术开展科学调查，以评价有害藻华毒素在海产品物种如珠蚌或牡蛎体内积聚的能力。

142. 如图 G-1 所示，成员国对实施这项技术的需求正在不断增加。因此，预计这项技术的利用在今后 10 年中将继续增多。

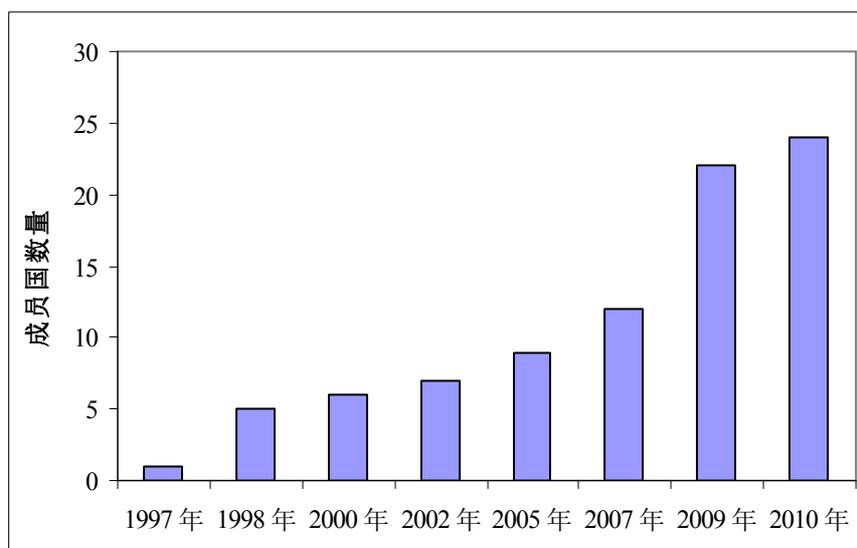


图 G-1. 已要求通过技术合作项目转让受体结合分析法的成员国总数。

G.2. 利用长寿命放射性核素了解环境过程

143. 由于长寿命放射性核素的高度变异性和不同的物理和化学特性，它们一直被用于生物地球化学过程的研究（如迁徙调查、海洋学调查或沉积调查）。这些核素的放射性特性以及随时间而变化的母亲-子体变异率被用来进行年代测定（如碳-14 测年或铀铅测年）和调查随时间变化的自然过程，如迁徙或沉积研究。

144. 这类长寿命放射性核素可作为环境中的天然和人造示踪剂及放射性时钟，使研究人员能够进行大规模环境过程的年代测定和研究及获得以其他方式不能获得的信息。

此外，由于围绕着气候假想方案和潜在环境反应的不确定性，研究活动正在日益转向使用基于放射性核素的示踪剂和测年方法，以提高对环境过程及海洋、淡水和陆地环境变化的了解。

145. 放射性核素提供了在定量基础上调查海洋资源、海洋学过程和海洋污染的工具，同时有助于解决海岸带管理问题。鉴于放射性核素随着时间的推移而衰变并因此含有“时钟”，可用它们来研究海洋环境在时间上的生物地球化学过程。

146. 在过去的 20 年中，由于无机质谱仪的飞速发展，电感耦合等离子体质谱仪特别是配备了双聚焦扇形场分析器的电感耦合等离子体扇形场质谱仪的使用逐渐成为用于长寿命放射性核素分析的传统放射分析方法（如 α 能谱测量和液体闪烁）的补充工具和替代工具。质谱测定技术之所以在同位素分析领域占据主导地位，是因为它们耗时少，能够具有较低的探测限值，而且非常精确和准确。电感耦合等离子体质谱仪有时是能够确定同位素“指纹”的惟一技术，特别是对一种元素的少量同位素来说尤其如此。

147. 可利用同位素丰度分析和（或）同位素比率分析来确定环境污染的来源，因为它们是污染的一种“指纹”。预计不同来源通过有实质区别的过程产生的化学物会显示特定的同位素组成，这些组成可用于确定化学物的来源。

148. 一旦确定了不同来源（如人为活动或地球自然因素所致），即可利用同位素丰度和同位素比率对来源分布进行量化。同位素特征是调查选定取样地点历史和环境变化的基础。

H. 水资源²¹

149. 利用稳定和放射性同位素进行的研究目前被用于为地下水综合管理提供支持，因为这些技术的时间效益和成本效益得到了更广泛承认。最近有若干利用同位素技术为地下水管理提供支持的案例。例如，在南美洲的瓜拉尼含水层系统、摩洛哥的塔德拉流域和非洲北部的努比亚沙岩含水层系统，不仅利用同位素数据的解释确认了传统水文学研究的结果，还提供了对地下水流量和含水层动态的深入认识。特别是，在这些地区利用同位素确定了地下水补给源和补给机制，测量了地下水的年龄和流动速率，并对不同含水层之间的地下水混合进行了量化。预计同位素技术在一般水文学调查和特定地下水资源综合管理中的应用将在今后若干年中显著增加。

²¹ 可从 GovAtom 网站《2011 年核技术评论》的相关文件中获得更多资料。

I. 放射性同位素生产和辐射技术

I.1. 放射性同位素和放射性药物

I.1.1. 成像和治疗用分子靶标制剂

150. 基于放射性同位素的成像模式如单光子发射计算机断层照相法和正电子发射断层照相法需要持续获得新的放射性药物（以放射性同位素标记的化合物或生物物质）来解决诊断问题。将高度特异放射性药物用作构成疾病起因的分子过程的生物标记是一种被称为“分子成像”的方法，它不是起着疾病的早期指示物的作用，就是被当作特别是测量癌症患者治疗功效的客观参数。许多标记化合物已被指定用作以往未探究的生物过程的靶标。这就需要制定替代方案的十分高效的制备程序。在正电子发射断层照相法领域，目前正在积极研究用于生产镓-68、氟-18 和碳-11 的新型发生器系统和小型回旋加速器以及基于微流体的新型自动合成模块。

151. 找到更多有效的癌症治疗方法是辐射医学领域面临的最为紧迫的挑战之一。分子诊断成像法成功地扩大了使用范围，并已被用于向肿瘤部位投送放射性治疗剂量，以摧毁癌细胞（放射性核素疗法）。实现这一点的方法是将合适的治疗用放射性核素纳入一种分子媒介物，这种分子媒介物经体内服用后，由于其对癌细胞选择性地表达的分子靶标特定的亲和性，将迅速堆积在肿瘤部位。这样，放射性便充分而牢固地保留在肿瘤部位，放射性核素衰变期间发射的粒子便在不必克服任何生物障碍的情况下与癌细胞密切相互作用。神经内分泌肿瘤是最适合这种利用被分别称为 DOATATOC 和 DOTATAE 的铟-90 标记肽和镱-177 标记肽的放射性核素疗法的疾病之一。放射性核素疗法的其他优势有：可以获得可与不同类型癌细胞选择性靶向治疗所用的各种载体生物分子发生化学联系并具有适合于治疗应用特点的大量放射性核素（如铟-90、镱-177、铜-67、铜-64、镱-188、铋-213）。

I.1.2. 钼-99 和锝-99m 的供应保证²²

152. 从 2007 年底直到 2010 年的三季度，裂变产生的钼-99 以及随后的锝-99m 发生器供应面临严重短缺，由此导致对探索和开发其生产所用替代技术的兴趣大增。²³ 利用不使用高浓铀的技术和解决相应的开发问题以及利用基于加速器的方案将有助于减轻对在裂变钼-99 行业服役的老化反应堆的依赖。例如，正在研究通过超高浓缩的钼-100 靶标[钼-100 (γ 射线、中子) 钼-99]在15—20兆电子伏电子加速器中的光核反应生产钼-99 的问题。²⁴

²² 亦见 D.2 节“研究堆”。

²³ 《2010 年核技术评论》附件七提供了更多的资料。

²⁴ 经合组织核能机构 2010 年关于“医用放射性同位素供应 — 钼-99 和锝-99m 潜在生产技术回顾”的报告。

153. 加拿大的研究人员提出基于回旋加速器直接生产钨-99m 作为一种实际的替代方法，以便至少部分缓解使用低/中能回旋加速器国家的短缺问题。每日直接生产所需数量的钨-99m 的经济性需要进一步加以研究。通过钨-100 ($p, 2n$) 钨-99m 反应直接生产钨-99m 的方法有赖于利用能够在 20—30 兆电子伏范围内加速质子的近 40 台回旋加速器（图 I-1.）。这一方法必须使用高度浓缩的钨-100 靶标，以确保医用所需钨-99m 的放射性核素纯度。

154. 因此，对上述无论哪种方法而言，浓缩钨-100 靶标的回收和循环利用技术都将是一项必要的先决条件，而且仍然需要发展适当的规程和方法。

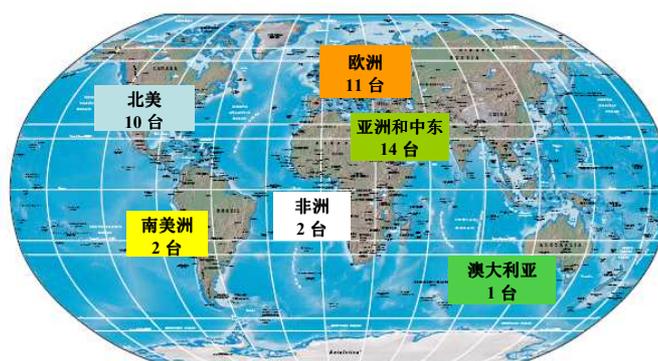


图 I-1. 医用同位素生产所用能量在 20 兆电子伏以上的回旋加速器分布情况（来源：美国布鲁克海文国家实验室 D. Schlyer 博士根据四个主要回旋加速器制造商提供的数据绘制）。

I.2. 辐射技术应用

I.2.1. 用于沉积物管理的综合放射性示踪剂和计算机模拟方案

155. 在过去的几年中，一个解决复杂的沿海和海床沉积物移动问题的综合性模拟和示踪剂方案得到越来越多地使用。放射性示踪剂技术提供沉积物迁移速度、沉积物厚度和速率等可用于验证数学模式的定量信息。已经开发出新型先进系统（图 I-2.），如与全球定位系统组合的小型数据获取系统，用以监测作为经纬度函数的放射性示踪剂浓集区；经过改进的注入系统，用以安全方便地注入放射性示踪剂；新型软件包，用以精确地处理和判读数据。例如，印度于 2009 年和 2010 年利用钨-46 标记的玻璃粉作为示踪剂在维萨卡帕特南港的一个现有的倾倒地和加尔各答港的两个拟议的倾倒地进行了放射性示踪剂调查。结果表明，现有倾倒地和一个拟议的倾倒地适合于倾倒地疏浚底泥，而另一个拟议的倾倒地则不适合，因为观察到有大量沉积物向航道方向移动。

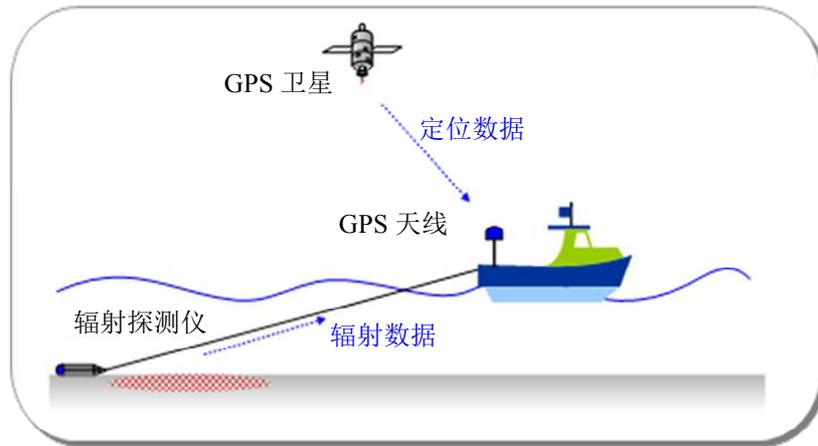


图 I-2. 与全球定位系统组合的 γ 射线计数系统用于沿海区沉积物示踪研究。

I.2.2. 低能电子束加速器

156. 工业电子加速器 2010 年成长最快的市场 (www.Radtech.org) 是低于 100 千电子伏到几百千电子伏区间的市场，这一区间的能量很低，利用高密度金属（最通常是铅，但最近是钢）足以提供防护。大多数低能电子束加速器都可以联机安装在连续的工业过程中，如印刷和涂料行业。

157. 通过电子束处理方法进行墨水、涂层和粘合剂固化使得不必使用挥发性有机化合物，从而使制造商能够以最低的能耗实现高速生产，并减少环境影响。在这些应用中，相比传统的烘干和固化技术，电子束技术带来的电耗下降幅度高达 90%。若干制造商可以提供小型低成本低能电子束加速器，以供实验室使用和纳入高速涂敷、印刷和表面处理工艺。图 I-3 显示以 80 到 120 千电子伏运行的这种机器的例子。



图 I-3. 自屏蔽低能先进电子束应用开发装置（来源：<http://www.aeb.com/>）。

158. 其他利用低能电子束加速器的例子包括食品包装业使用的热缩纳米复合薄膜的交联。这种薄膜可延长肉制品、家禽产品和乳制品的保存期限，并用于制作防篡改包装。为了响应市场对革新不断变化的需求，电子束在固化包装材料和其他方面的应用在过去两年不断增多。