

第五十四届常会

临时议程项目 16
(GC(54)/1)

2010 年核技术评论

总干事的报告

概 要

- 应成员国的要求，秘书处每年编写一份综合性的“核技术评论”。今年的报告随附于后，其中突出强调了主要发生在 2009 年的引人注目的发展情况。
- 《2010 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、放射性同位素生产以及辐射技术。与《2010 年核技术评论》有关的补充文件已在原子能机构网站¹上以英文提供，其中介绍了以下方面的发展情况：用于癌症治疗的核医学；治疗跨境动物疾病的核技术；用于监测海洋污染的核技术；核设施退役；扩大核电所需的人力资源；新核电计划的基础结构；以及钼-99 的生产与供应。
- 有关原子能机构核科学技术活动的资料亦可参阅国际原子能机构《2009 年年度报告》(GC(54)/4 号文件)，特别是其中的“技术部分”，还可参阅《2009 年技术合作报告》(GC(54)/INF/4 号文件)。
- 对《2010 年核技术评论》已作修改，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/GC54/Agenda/index.html>。

目 录

正文摘要.....	1
A. 动力应用.....	2
A.1. 当今的核电.....	2
A.2. 核电的预期增长.....	6
A.3. 燃料循环.....	7
A.3.1. 铀资源和生产.....	7
A.3.2. 转化、浓缩和燃料制造.....	9
A.3.3. 燃料循环后端.....	10
A.4. 影响核电增长的其他因素.....	10
A.4.1. 经济性.....	10
A.4.2. 安全性.....	12
A.4.3. 人力资源开发.....	13
B. 先进的裂变和聚变.....	15
B.1. 先进的裂变.....	15
B.1.1. “革新型核反应堆和燃料循环国际项目”和“第四代国际论坛”... 15	15
B.1.2. 国际核能合作框架.....	16
B.1.3. 先进裂变的其他发展.....	16
B.2. 聚变.....	16
C. 原子数据和核数据.....	17
D. 加速器和研究堆的应用.....	18
D.1. 加速器.....	18
D.2. 研究堆.....	18
E. 粮食和农业领域的核技术.....	19
E.1. 改进牲畜的繁殖力和健康.....	19
E.2. 虫害防治.....	21
E.3. 食品质量和安全.....	23
E.4. 作物改良.....	24
E.5. 可持续的水土管理.....	24
E.5.1. 利用同位素方法改进农业用水管理.....	24
E.5.2. 土壤有机碳螯合和气候变化缓解.....	25
F. 人体健康.....	26
F.1. 利用核技术抗击营养不良.....	26
F.2. 混合成像的单光子发射计算机断层照相法/计算机断层照相法（SPECT/CT） 以及正电子发射断层照相法/计算机断层照相法（PET/CT）.....	27

F.3.	辐射肿瘤学应用方面的进步	29
F.4.	数字技术对放射性 X 射线成像的影响	29
G.	环境	30
G.1.	核技术用于海底地下水露头的量化	30
G.2.	了解碳循环：应用核技术评定从海洋到海底的粒子通量	31
H.	水资源	32
H.1.	“先查明情况，后采取行动”	35
H.2.	利用稳定同位素了解地下水的供应和质量	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.	放射性同位素产品及其供应	36
I.1.2.	钋-99 的供应保证	37
I.2.	辐射技术应用	38
I.2.1.	无菌包装材料和容器电子束消毒	38
I.2.2.	碳基纳米结构的辐射合成	39

2010 年核技术评论

总干事的报告

正文摘要

1. 2009 年，有 12 座新核动力堆开工建设，这是 1985 年以来此类开工建设数量最多的一年。未来核电增长的预期再次作了上调。但在这一年中，并入电网的新反应堆仅有两座，退役的反应堆有三座，全世界核电总装机容量连续第二年略有下降。
2. 当前的扩大以及近期和远期的增长前景仍以亚洲为中心。新开工建设的 12 座反应堆有 10 座在亚洲，两座新并入电网的反应堆也在亚洲。2008 年下半年开始的全球金融危机尽管未降低对核电的总体预测，但却被列为近期影响世界一些地区核项目的推迟或延期开工的一个促进因素。
3. 在以往对未来使用核电加以限制的一些欧洲国家，则出现了重新考虑这种政策的趋势。
4. 启动新核电计划的兴趣依然高涨。60 多个成员国已经向原子能机构表示考虑引进核电的兴趣，2009 年，原子能机构对约旦、印度尼西亚和越南开展了其首次“综合核基础结构评审工作组”访问。
5. 已确定常规铀资源的估计数量（按低于每千克铀 130 美元计算）略有上升，主要是澳大利亚、加拿大和纳米比亚报告数量的上升。铀现货价格出现下滑，2009 年的最终数据预计将显示铀矿勘探和开发水平也随之下降。
6. 理事会已授权原子能机构总干事与俄罗斯联邦签署建立国际低浓铀储备协定。该储备库将储备 120 吨低浓铀，以便向其低浓铀供应因非商业原因中断而受到影响的国家供应低浓铀。2010 年 3 月签署了原子能机构与俄罗斯联邦之间的协定。
7. 经过近 20 年的遴选过程，瑞典核燃料和废物管理公司选择了东哈马尔市作为乏燃料最终地质处置库的场址。在美国，政府决定终止开发尤卡山高放废物永久处置库，但继续许可证审批过程。政府计划设立一个委员会来评价各种替代方案。
8. 就核聚变而言，已经完成了国际热核实验堆的场址准备工作，并签署了价值约 15 亿欧元的设施采购安排，该金额约占预计采购总值的三分之一。美国“国家点火装

置”的建设工作已经完成。

9. 粮食安全、人体健康（包括疾病防治）、环境保护、水资源管理以及利用放射性同位素和辐射都是可以利用核技术和同位素技术来支持全世界许多国家社会经济发展的领域。

10. 在粮食和农业领域，正在利用核技术及补充技术解决越来越多地威胁农业生产率和国际贸易的虫害问题。对牲畜遗传资源进行分析是国际社会的一个高度优先事项，因为这种分析为畜牧生产的可持续扩大提供了至关重要的方案。核技术可以为这种努力提供帮助。由于对碳释放的关切日增，土壤碳贮存（整合）方案引起了越来越大的兴趣。同位素工具有益于确定特定土地区域的碳整合能力。

11. 诊断成像继续成为最具创新性的现代医学领域之一。正电子发射断层照相法（PET）、单光子发射计算机断层照相法（SPECT）和计算机断层照相法（CT）等核技术正越来越多地被合并到 SPECT/CT 和 PET/CT 等混合成像系统中。这些混合成像系统可以有助于开展对解剖学和人体器官活动的合并调查。这种混合成像技术在心脏病学和癌症领域变得越来越重要。利用稳定同位素技术评定弱势群体对铁和维生素 A 类胡萝卜素的生物利用率的最新结果将有助于决策者、保健专业人员和其他利益相关者确定接下来的步骤和响应方案。

12. 在自然资源管理领域，正在利用核技术评定通过沿海含水层进入沿海地区的淡水量。这一点十分重要，因为这种海底地下水露头可以成为重要的淡水来源，而且在某些情况下还可能成为沿海地区污染物的来源。稳定同位素越来越多地被用来了解影响当地和区域地下水利用率和质量的各种过程的空间分布情况。这种资料可以为评定气候变化和其他因素对地下水资源的影响提供一个关键的基准。

13. 2009 年，由于对所面临的医用同位素特别是裂变产生的钼-99 供应严重短缺所做的高水平媒体报道，对医用和工业用放射性同位素日益增长的需求以及相关技术的进步受到了全世界的关注。新辐射技术应用继续得到开发，最近对一种新电子束方法的利用即是证明，这种方法提供了采用一种不含化学品的替代物来对无菌包装材料和容器进行消毒或清洁。

A. 动力应用

A.1. 当今的核电

14. 就核电而言，2009 年是新反应堆开工建设数量连续升高和对未来核电增长的预期连续上调的第二年。虽然 2008 年作为自 1955 年以来第一年没有任何新反应堆并网而不同寻常，但 2009 年有两座新反应堆并入电网，它们是日本的泊 3 号反应堆（866 兆

瓦（电））和印度的拉贾斯坦 5 号反应堆（202 兆瓦（电））。

15. 截至 2010 年 1 月 1 日，全世界共有 437 座核动力堆在运行，总容量达到 371 吉瓦（电）（见表 A-1）。该容量比 2008 年底的容量约低 1.5 吉瓦（电），其部分原因是日本的滨冈-1 号和 2 号反应堆及立陶宛的伊格纳林纳 2 号反应堆退役所致，后者于 2008 年年底退役。

16. 目前有 12 座反应堆正在开工建设，它们是：中国的红沿河 3 号和 4 号反应堆、三门 1 号和 2 号反应堆、阳江 2 号反应堆、福清 2 号反应堆、方家山 2 号反应堆、海阳 1 号反应堆和台山 1 号反应堆（这些反应堆的容量均为 1000 兆瓦（电））；大韩民国的新古里 4 号反应堆（1340 兆瓦（电））；俄罗斯联邦的新沃罗涅日二期 2 号机组（1085 兆瓦（电））和罗斯托夫 3 号机组（1011 兆瓦（电））。斯洛伐克莫霍夫采 3 号和 4 号反应堆（均为 405 兆瓦（电））已复工建造。相比之下，2008 年有 10 座反应堆开工建设，而 2007 年有八座反应堆开工建设，另有一座反应堆复工建造。

17. 因此，截至该年底共有 56 座反应堆在建，是自 1992 年以来在建数量最多的一年。

18. 当前的扩大以及近期和远期的增长前景仍以亚洲为中心。2009 年开工建设 12 座反应堆中，有 10 座在亚洲。如表 A-1 所示，在建的 56 座反应堆有 36 座在亚洲，最近并网的 41 座新反应堆中有 30 座也在亚洲。中国的目标是到 2020 年达到 40 吉瓦（电）核电容量，而当前为 8.4 吉瓦（电）。印度总理曼莫汉·辛格于 9 月在新德里举行的和平利用原子能国际会议上致开幕词时说，印度到 2050 年可能有潜力达到 470 吉瓦（电）装机容量。

19. 芬兰已向政府提交了关于建造两座新核反应堆的申请，供其作出“原则决定”。但奥尔基卢奥托 3 号反应堆的建造已落后于进度。

20. 2009 年继续保持了近期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，核管理委员会批准了另外八个为期 20 年的许可证延期（得到许可的寿期总计为 60 年），从而使已批准的许可证更新的总数达到 59 个。英国核装置检查局批准了两座反应堆更新的定期安全评审，使其能够再运行 10 年。西班牙加罗纳核电厂的许可证被核准延长四年。加拿大布鲁斯 A 和布鲁斯 B 核电厂的运行许可证又被更新了五年。

21. 在以往对未来使用核电加以限制的一些欧洲国家出现了重新考虑这种政策的趋势。

22. 虽然始于 2008 年下半年的全球金融危机并未降低对核电的总体预测（见 A.2 节），但却被列为近期影响世界一些地区核项目的推迟或延期开工的一个促进因素。万滕福尔电力公司（Vattenfall）在 6 月宣布，鉴于经济衰退和市场情况，它正在将关于在英国建造新核反应堆的决定搁置 12—18 个月。燃气苏伊士集团（GDF SUEZ）电力公司和莱茵集团（RWE）电力公司从保加利亚贝勒尼项目退出就涉及到金融困难。俄

罗斯联邦宣布，在今后几年，由于金融危机和较低的用电预测，它将原计划每年发展两座反应堆缩减为一座。由于电力需求下降，加拿大安大略电力公司暂停了拟在达灵顿场址建造的两座新核动力反应堆的采购活动。在美国，鉴于国内经济的不确定性，爱克斯龙电力公司（Exelon）推迟了在得克萨斯州进行的拟议中的一座新核电厂的大规模基建前期工作。在美国 18 个联合许可证申请的 28 座反应堆中，有五座反应堆的审查工作已在 2009 年底因申请人的请求而被搁置。在南非，埃斯科姆（Eskom）公司将其原计划建造的下一座反应堆的建造进度延后两年，到 2018 年。

23. 但与对未来增长的预测一样（见 A.2 节），对启动新的核电计划的兴趣依然高涨。60 多个成员国已向原子能机构表示了考虑引进核电的兴趣。2009 年，原子能机构有关引进核电技术合作项目的数量增加了三倍。原子能机构有关一项新服务的小册子《综合核基础结构评审工作组访问：准备和开展综合核基础结构评审工作组访问的导则》已经印发，并在约旦、印度尼西亚和越南进行了首批综合核基础结构评审工作组访问。综合核基础结构评审工作组访问是在原子能机构协调下由国际专家小组根据原子能机构 2008 年底印发的《国家核基础结构发展状况的评价》开展的同行评审。其中的每一次评审都要根据提出请求成员国的需求对评审的目标和范围进行调整。与自评定一样，综合核基础结构评审工作组访问旨在帮助有关国家确定里程碑与其计划发展当前水平之间的差距并有效地处理这些差距。

表 A-1. 全世界正在运行和建造的核动力反应堆（截至 2010 年 1 月 1 日）^a

国家	在运反应堆		在建反应堆		2009 年供应的核电量		截至 2009 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	7.6	7.0	62	7
亚美尼亚	1	375			2.3	45.0	35	8
比利时	7	5 902			45.0	51.7	233	7
巴西	2	1 884			12.2	2.9	37	3
保加利亚	2	1 906	2	1 906	14.2	35.9	147	3
加拿大	18	12 569			85.3	14.8	582	2
中国	11	8 438	20	19 920	65.7	1.9	99	3
捷克共和国	6	3 678			25.7	33.8	110	10
芬兰	4	2 696	1	1 600	22.6	32.9	123	4
法国	59	63 260	1	1 600	391.8	75.2	1 700	2
德国	17	20 480			127.7	26.1	751	5
匈牙利	4	1 889			14.3	43.0	98	2
印度	18	3 987	5	2 708	14.8	2.2	318	5
伊朗伊斯兰共和国			1	915				
日本	54	46 823	1	1 325	263.1	29.2	1 440	8
大韩民国	20	17 705	6	6 520	141.1	34.8	339	7
墨西哥	2	1 300			10.1	4.8	35	11
荷兰	1	487			4.0	3.7	65	0
巴基斯坦	2	425	1	300	2.6	2.7	47	10
罗马尼亚	2	1 300			10.8	20.6	15	11
俄罗斯联邦	31	21 743	10	8 007	152.8	17.8	994	7
斯洛伐克	4	1 762	2	782	13.1	53.5	132	7
斯洛文尼亚	1	666			5.5	37.8	28	3
南非	2	1 800			11.6	4.8	50	3
西班牙	8	7 450			50.6	17.5	269	6
瑞典	10	9 036			50.0	37.4	372	6
瑞士	5	3 238			26.3	39.5	173	10
乌克兰	15	13 107	2	1 900	78.0	48.6	368	6
英国	19	10 137			62.9	17.9	1 457	8
美利坚合众国	104	100 747	1	1 165	796.9	20.2	3 499	11
总计 ^{b,c}	437	370 705	56	51 940	2 558.3	14%	13 913	0

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

b. 说明：总计包括了立陶宛和中国台湾的下列数据：

立陶宛：核发电量为 10.0 太瓦·小时，占其总发电量的 76.2%。

中国台湾：六台机组，4980 兆瓦（电）在运行；两台机组，2600 兆瓦（电）在建；核发电量为 39.9 太瓦·小时，占其总发电量的 20.7%。

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）和立陶宛（43 年零 6 个月）以及中国台湾（170 年 1 个月）的已关闭电厂。

A.2. 核电的预期增长

24. 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。2009年，尽管在2008年早些时候开始出现金融危机，但还是对低值预测和高值预测两者都作了上调。在经修订的低值预测中，2030年全球核电装机容量将达到511吉瓦（电），而2009年底的预测为371吉瓦（电）。在经修订的高值预测中，该数值达到807吉瓦（电）。这些修订后的2030年预测比2008年的预测高8%。

25. 对远东的预测上调幅度最大，这个地区包括中国、日本和大韩民国。对北美和东南亚及太平洋的预测进行了适度下调。

26. 始于2008年早些时候的金融危机影响到一些核电项目的前景，但其影响在世界不同地区则不尽相同。修订预测的地区模式一部分反映了金融危机在不同地区造成的不同影响。低值预测和高值预测两者普遍上调反映了原子能机构召集的专家所做的判断，即驱动对核电的预期不断增长的中长期因素并没有实质性改变。核电厂的实绩和安全继续保持良好。对全球变暖、能源供应安全以及居高和动荡的化石燃料价格的关切依然存在。所有研究都仍然预测在中长期内对能源的需求将持续增加。

27. 自2008年做出预测以来所发生的变化是政府、电力公司和供应商对其已宣布计划的承诺以及它们已在这些计划方面的投资，而这被普遍认为将会随时间变得更加坚定。这种情况提振了信心。另一个变化是核供应商解除了以往对核贸易的限制，从而使印度得以加速实施其核电扩展计划。

28. 原子能机构的核电预测并不是2009年作出上调的惟一核电预测。美国能源情报署、经合组织国际能源机构（国际能源机构）和世界核协会都于2009年发表了新的预测。美国能源情报署的预测范围略为缩小，世界核协会的预测范围则略有扩大，而国际能源机构的范围略微上调（低值和高值均增加）。图A-1对2009年美国能源情报署、国际能源机构、原子能机构和世界核协会的核电预测范围进行了比较。

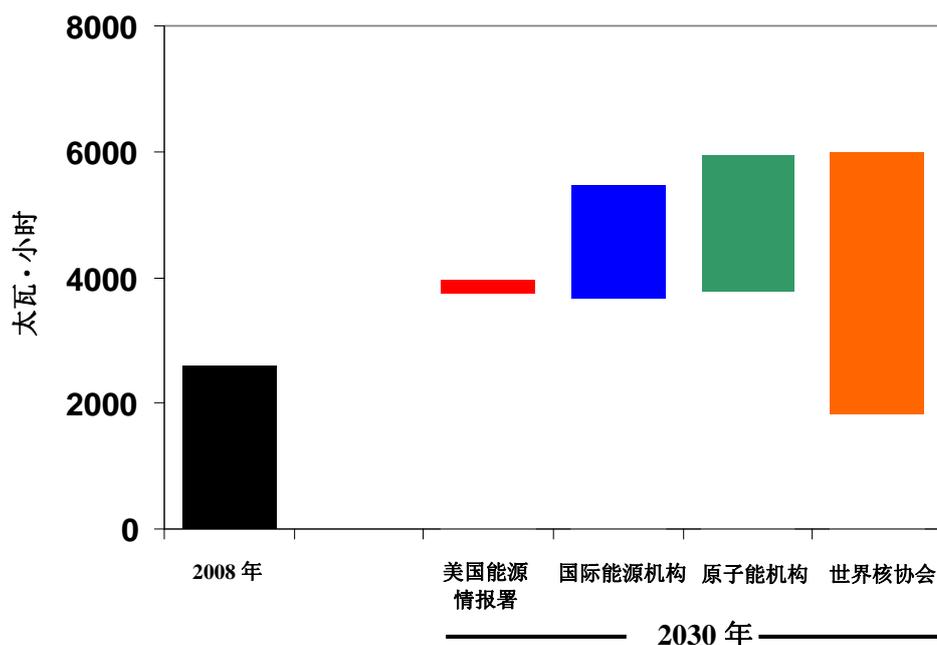


图 A-1. 美国能源情报署、国际能源机构、原子能机构和世界核协会核电预测比较。

A.3. 燃料循环²

A.3.1. 铀资源和生产³

29. 以低于 130 美元/千克铀的成本回收的已确定常规铀资源目前估计为 570 万吨铀，较 2007 年增加了 20 多万吨铀，这主要是澳大利亚、加拿大和纳米比亚已报告的增加所致。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还有 70 万吨铀。为参考起见，2009 年铀的现货价格在 110 美元/千克铀和 135 美元/千克铀之间波动，并略呈逐渐下降的趋势。

30. 成本低于 130 美元/千克铀的未发现的常规资源估计为 630 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 20 万吨铀。这一数量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具推测性的资源。估计还另有 360 万吨的推测铀资源，其生产成本还未确定。

31. 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值为

² 有关原子能机构燃料循环活动的更详细资料可见国际原子能机构最新年度报告相关部分 (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>)。亦可参阅以下网址: <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/index.html>。

³ 本节内容系基于即将出版的“红皮书”(经合组织核能机构-原子能机构《2009 年铀资源、生产和需求》，经合组织，巴黎(2010 年))。

1000 万吨铀量级。比利时、哈萨克斯坦和美国过去进行过利用磷酸的大量生产，由于近来铀价格较高，澳大利亚、巴西、法国、印度、约旦、摩洛哥、突尼斯和美国重新对这一领域产生了兴趣。中国正在研究从火电生产产生的煤灰堆中萃取铀。也能够用作核燃料资源的钍非常丰富，在自然界分布广泛，而且在许多国家是一种易于开采的资源。估计世界范围内的这种资源约有 600 万吨钍。尽管钍作为燃料一直在进行示范性使用，但在其能够与铀平起平坐加以考虑之前还需要作大量的进一步工作。

32. 海水据估计含有约 45 亿吨铀，但浓度极低，仅为 3.3×10^{-9} 。因此，33 万吨海水才能经处理生产出一千克铀。目前，这种生产方式过于昂贵。德国、意大利、日本、英国和美国在 20 世纪 70 年代至 80 年代进行过研究。日本当前的台架规模海洋实验表明，利用固定在海底的辫状吸附剂或许有可能把铀提取出来，每年的生产能力为 1200 吨铀，估计成本约为 300 美元/千克铀。法国和印度也在开展实验室规模研究。

33. 由于铀的现货价格照比 2008 有所降低，预计在获得 2009 年的最终数据时，这些数据将显示铀矿勘探和开发水平也在下降。无论过去就勘探和开发铀矿床的国家还是新加入铀矿勘探的国家，预计都会出现这种情况。

34. 2008 年，全世界的铀产量超过 43 800 吨铀，比 2007 年的 41 300 吨铀增长 6%。估计 2009 年铀产量将增加到 4.9 万吨铀。如图 A-2 所示，加拿大、哈萨克斯坦和澳大利亚 2008 年的铀产量占到世界总产量的近 60%。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%。

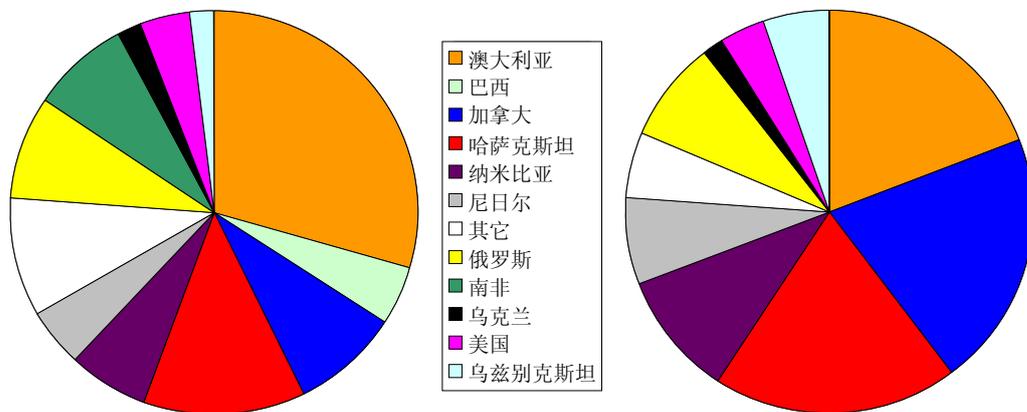


图 A-2. 2008 年以低于 130 美元/千克铀回收的已确定常规铀资源的地理分布 (左图) 和铀产量的地理分布 (右图)。

35. 预测的 2009 年铀产量预计仅涵盖全世界反应堆 65 400 吨铀的估计需求约 75%。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钷-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 含量低于 0.7%)。按估计的 2009 年消耗率，以低于 130 美元/千克铀回收的 570 万吨铀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。

A.3.2. 转化、浓缩和燃料制造

36. 全球总转化能力就六氟化铀而言约为每年 7.6 万吨天然铀，就二氧化铀而言为每年 4500 吨天然铀。当前的六氟化铀转化需求约为每年 6.2 万吨天然铀。2009 年，阿雷瓦集团公司开始建造其新的 COMURHEX II 转化设施，以替代位于法国马勒维西和皮埃尔拉特的老旧设施。COMURHEX II 的四氟化铀和六氟化铀设计转化能力为到 2012 年每年 1.5 万吨天然铀。2008 年，加拿大能源和矿产公司和哈萨克斯坦国家原子能公司宣布设立一个合资公司，以便在哈萨克斯坦发展一座 1.2 万吨六氟化铀转化设施。

37. 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。在建的有三座新的商业规模浓缩设施，它们是法国的乔治·贝斯 II 和美国的美国离心分离厂和国家浓缩设施。它们全采用离心浓缩法。乔治·贝斯 II 和美国离心分离厂都计划让现有的气体扩散浓缩厂退役。在乔治·贝斯 II，第一套离心机级联于 2009 年 12 月开始旋转。在美国的国家浓缩设施，2009 年 9 月安装了第一台离心机。就美国离心分离厂而言，对技术成熟度还存在一些疑问。⁴ 美国核管理委员会开始正式审查另外两座设施，即阿雷瓦集团公司建议的爱达荷鹰石浓缩设施和全球激光浓缩公司建议的北卡罗来纳激光浓缩设施。

38. 日本核燃料有限公司预计在 2011 前后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 万分离功单位扩大到至 2020 年的 150 万分离功单位。中国目前利用俄罗斯离心机的浓缩能力为 130 万分离功单位，俄罗斯和中国最近已商定增加 50 万分离功单位。阿根廷、巴西、印度和巴基斯坦只有满足国内需要的有限浓缩设施。乌克兰与亚美尼亚、哈萨克斯坦和俄罗斯联邦一道成为了国际铀浓缩中心的成员。国际铀浓缩中心于 2007 年在俄罗斯联邦安加尔斯克建立。

39. 11 月，理事会授权原子能机构总干事与俄罗斯联邦签署建立国际低浓铀储备协定。该储备库将储备 120 吨低浓铀，以便向其低浓铀供应由于非商业原因而中断的国家供应低浓铀。总干事将惟一有权按照与俄罗斯联邦的协定中的标准拨付该储备中的低浓铀。俄罗斯联邦将有义务颁发这种低浓铀出口所需的一切授权书和许可证，接受低浓铀的国家将按当时的市场价格付款。2010 年 3 月签署了原子能机构与俄罗斯联邦之间的协定。

40. 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）。需求总量约为每年 10 400 吨。现有设施例如在中国、大韩民国和美国正在以某种方式予以扩大。混合氧化物燃料的当前制造能力约为 250 吨重金属，主要来自法国、印度和英国，在日本和俄罗斯联邦则有一些

⁴ 美国能源部推迟了对贷款担保申请的审查，以便处理与美国离心分离厂的浓缩技术成熟情况有关的问题。

较小的设施。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。11月，日本玄海 3 号反应堆开始利用混合氧化物燃料运行，从而成为日本第一座利用混合氧化物燃料的反应堆。全世界目前有 31 座热堆使用混合氧化物燃料。

A.3.3. 燃料循环后端

41. 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。离堆贮存设施正在通过增加现有干法贮存设施模块和建设新设施两种方式定期予以扩大。全球总后处理能力约为每年 5000 吨重金属。日本六所村新的后处理厂被延期到 2010 年完工。

42. 经过近 20 年的遴选过程并于 2002 年将申请场址名单缩减到两个之后，瑞典核燃料和废物管理公司选择了东哈马尔市作为乏燃料最终地质处置库的场址。随后的场址调查得出了东哈马尔市的基岩比另一可能的场址奥斯卡港的基岩更稳定且含水更少的结论。该公司计划于 2010 年申请建造许可证，目标运行时间定为 2023 年。

43. 对位于芬兰奥尔基卢奥托和法国比尔地区的处置库的场址调查继续按计划进行，它们的目标运行日期分别定在 2020 年和 2025 年。

44. 在美国，政府决定终止开发尤卡山高放废物永久处置库，同时继续许可证审批过程。政府计划设立一个委员会来评价各种替代方案。

45. 英国启动了自愿选址过程。临近塞拉菲尔德的两个自治市镇已表示对此感兴趣。

46. 2009 年，美国加利福尼亚兰乔塞科核动力堆完成退役，使得全球完全拆卸的动力堆数量达到 15 座。51 座已关闭反应堆正处于拆卸过程中，48 座被保持在安全关闭模式，3 座已经被埋葬，另外 6 座尚未确定退役战略。

A.4. 影响核电增长的其他因素

A.4.1. 经济性

47. 据《2009 年核技术评论》报告，照比《2006 年核技术评论》所报告的 1200—2500 美元/千瓦（电），新核电厂的成本概算幅度提高了上限。去年的成本概算仍然很高。图 A-3 显示了原子能机构所收集的按地区分列的最新隔夜成本概算范围。⁵

⁵ 数据取自公开的成本研究报告和行业报价单。《2009 年核技术评论》所作的说明都适用：成本概算的差异可能反映了隔夜成本的不同定义，而不论是该概算适用于在荒地上建造还是在已有反应堆的场址上建造；也不论场址是否处在地震活跃区；是否存在劳工和材料成本方面的差异；是否有不同的本地化要求；本地制造或采购的电厂部件百分比是否不同；补贴和财务担保是否不同；监管要求及其可预见性方面是否存在差异；合同安排是否不同；汇率和对通货膨胀的预期是否不同；以及技术是否不同。

48. 图中的总体模式是与经验可以减少成本不确定性的观察结论一致的。尽管亚洲的成本低（即一般低于其他地方的投入成本和有时仅包括进口部件的费用报价）有若干原因，但亚洲也是具有新反应堆建设方面最新经验的地区。

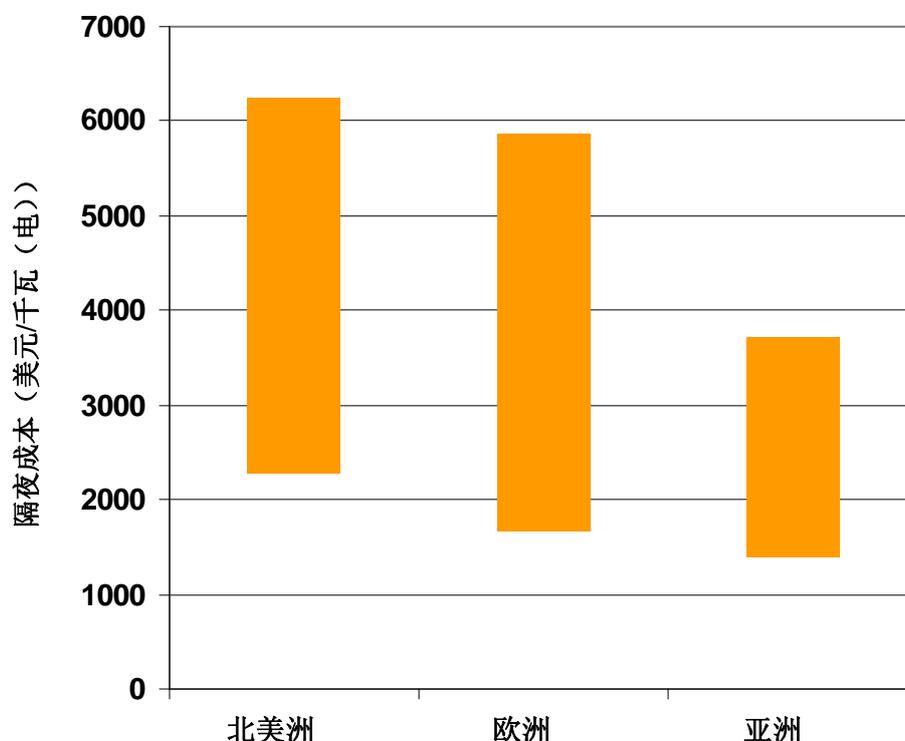


图 A-3. 2007—2009 年按地区分列的隔夜成本概算范围（以 2008 年美元计）。⁶

49. 如图 A-3 中所收集的那样，随着更多具体核电项目成本概算报告的提交，所发表的学术性核电成本概算越来越少。但 2009 年发表了若干这样的研究报告。

50. 麻省理工学院对其 2003 年完成的美国的成本研究报告⁷做了更新，其更新后的 4000 美元/千瓦（电）隔夜成本概算额十分接近图 A-3 中北美洲概算的平均值。麻省理工学院经过更新的研究报告的结论是，在美国，由于缺乏最新经验以及随之而来在投资者之间产生的不确定性，核电的资本费用高于燃煤和天然气发电的资本费用。如果没有这种“风险溢价”，则即使不征收二氧化碳排放税（费），甚至在有 4000 美元/千瓦（电）隔夜成本的情况下，核电的估计“电力归一化价格”也会与燃煤和天然气发电相当。美国的政策目前规定对有限数量的新核电厂实行贷款担保和生产税抵免，它们所起的作用是抵消“风险溢价”。但该研究报告得出结论认为，美国核电的长期扩大

⁶ 本图反映了 85 项隔夜成本概算，其中 26 项属于北美洲，32 项属于欧洲，27 项属于亚洲。

⁷ 麻省理工学院，“核电的未来：麻省理工学院的一项跨学科研究”（2003 年）。见 <http://web.mit.edu/nuclearpower/>。

将需要永久消除这种“风险溢价”，而这只有通过得到证明的成功实绩才能实现。

51. 另一项由花旗集团投资研究部发表的研究报告估计，英国一般新核反应堆的隔夜成本为 3700—5200 美元/千瓦（电）。这符合图 A-3 所报告的欧洲特定项目成本概算的范围。图 A-3 还包括经合组织国际能源机构和经合组织核能机构最近发表的研究报告《2010 年发电成本预测》所报告的费用概算。该项研究的结论是，由于财务、技术和监管条件不同，因此各国隔夜成本概算的差异很大。亚洲报告的成本概算较低，特别是大韩民国为 1556 美元/千瓦（电），这已使得自 2000 年以来有四座新反应堆并入电网，并有六座在建。

A.4.2. 安全性⁸

52. 由核电营运者联合会公布的并复载于图 A-4 和图 A-5 中的安全指标在 20 世纪 90 年代有了明显改进。近年来，一些领域稳定地保持了这种状况。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。

53. 原子能机构《2009 年核安全评论》（GC(54)/INF/2 号文件）更详尽地介绍了与所有核应用活动有关的安全信息和最新发展。

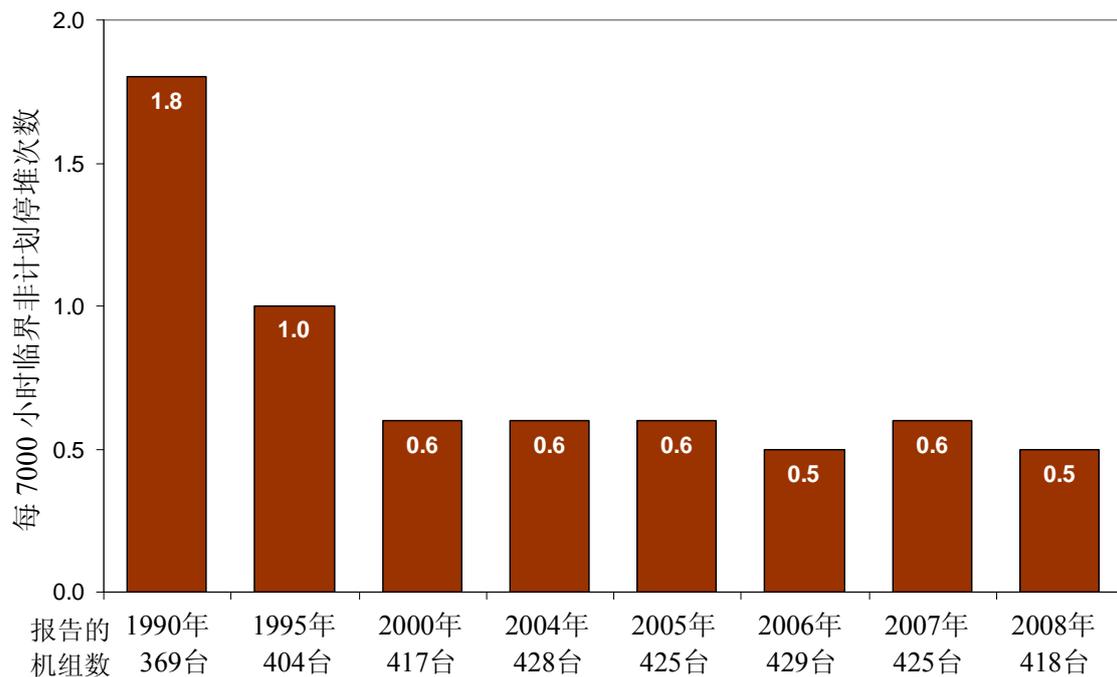


图 A-4. 每 7000 小时临界非计划停堆次数（来源：核电营运者联合会 2008 年实绩指标）。

⁸ 有关原子能机构核安全活动的更详细资料可见最新年度报告相关部分（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>）和 <http://www-ns.iaea.org/>。

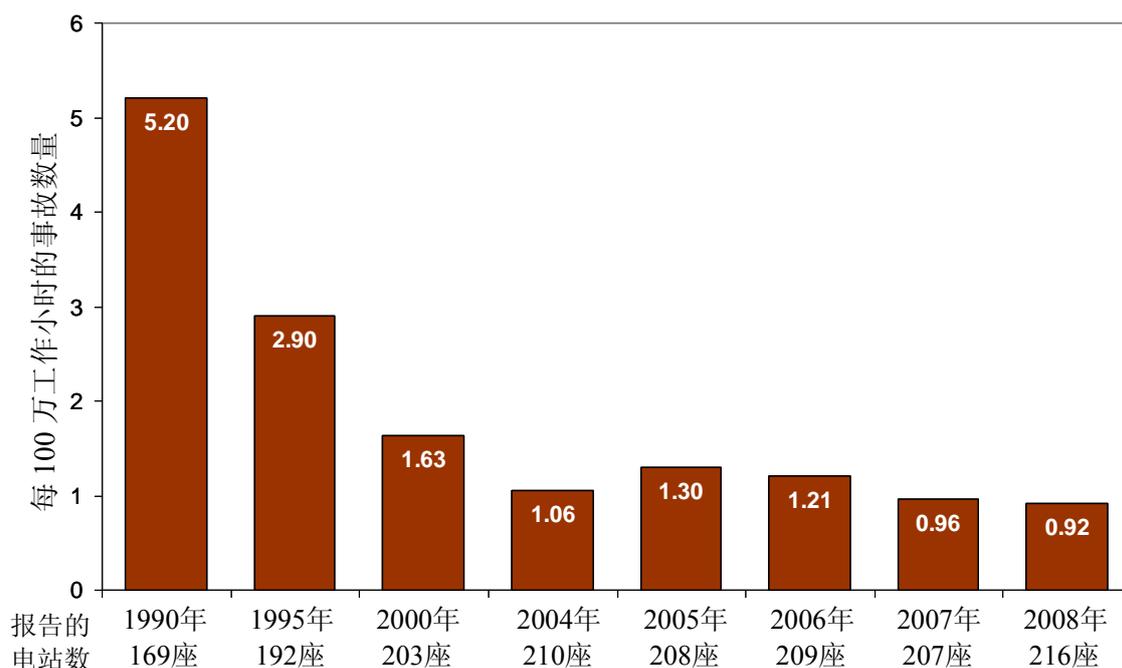


图 A-5. 核电厂每 100 万人·工作小时的工业事故数量（来源：核电营运者联合会 2008 年实绩指标）。

A.4.3. 人力资源开发

54. 与 A.2 节论述的任何预测有关的人力资源需求估计数无法轻易获得，而有关当今具备核工业所需各种技能的人数和正在参加相关教育与培训计划的人数的数据也非常少。随着对核电兴趣的增加，人们已对具备核工业所需技能的人员可能出现短缺表示关切，但人们也同时承认，各国的情况因各种因素不同而有所差异，但最重要的是由于各国核电计划的实力不一而不尽相同。

55. 对于可能出现人力短缺的关切促使政府和工业界采取了吸引大学生和扩大核相关领域教育与培训的举措。根据已有的数据，这些举措似乎取得了成效。例如，在部分地通过内部“技能更新”项目的支持下，法国电力公司 2008 年招聘了四倍于 2006 年的专业人员，并预计将这种较高的招聘水平再保持几年。阿雷瓦集团公司 2009 年雇佣了 8000 名工程师，并计划在未来数年中再招聘几千人。上述两公司都将受益于由总统发起并于 2008 年设立的法国核科学技术培训协调委员会。在美国，借助于提高了核能职业能见度的政府资金和两年一次的人力资源需求调查，攻读核工程学学生的入学率过去五年上升了 46%。中国正在制订到 2020 年为其核电计划招聘 2 万名新工程师的五年计划，印度核电公司正在扩大其现有的招聘计划，准备到 2017 年使其工程师队伍扩大一倍以上。

56. 如果 A.2 节所述核电高值预测得以实现，上述努力就必须取得成功，而且还要复制若干倍。这将是一项巨大的挑战。例如，原子能机构的高值预测将需要到 2030 年每年平均建设 22 座新反应堆。这一数字比 2000 年至 2009 年每年平均三座新反应堆并网

要高得多，甚至比 20 世纪 70 年代期间每年平均 16 座新反应堆还要高三分之一。即使是高值预测，核电装机容量的增长速度仍只比总发电量快 0.5%。这就意味着核电的人力资源需求将只会比煤炭、天然气和可再生能源发电对人力资源的需求略大一些。核电面临的挑战并不具有特殊性。

57. 但为了迎接这一挑战，需要有比较精确的数字才能：

- 对不同国家核电厂设计、监管、制造、建设、运行和支助的职工队伍需求作出估计；
- 对现有计划满足这种需求的能力作出估计；
- 对扩大现有教育和培训计划以弥补预测的职工队伍方面的差距所需的投资和建造周期作出估计。

58. 经合组织核能机构目前正在努力汇集人力资源需求信息，其重点是其 2000 年题为“核教育和培训：关切的缘由”的报告后经合组织的趋势和欧洲核能论坛。但汇总和分析上述数据以便就全球一级的核电人力资源问题得出更全面的结论需要作出协调一致的国际努力。因此，在经合组织核能机构、核电营运者联合会、世界核协会、美国核能研究所和洛斯阿拉莫斯国家实验室、日本原子力开发机构、英国科进能源部门技能委员会等的合作下，原子能机构计划在 2010 年 3 月在阿布扎比举行的“引进和扩大核电计划的人力资源开发问题国际会议”上宣布发起一项新的国际倡议。作为该倡议的结果，计划在全球范围内开展以下活动：调查现有核电厂包括其承包商和供应商的人力资源情况；调查核监管机构人力资源的供需情况；调查对核电提供支持的教育机构和计划的情况；开发供正在考虑或启动新核电计划的国家使用的职工队伍规划工具；以及将上述内容纳入一个可用于模拟全球或国家人力资源供需情况的可访问数据库。

B. 先进的裂变和聚变

B.1. 先进的裂变⁹

B.1.1. “革新型核反应堆和燃料循环国际项目”和“第四代国际论坛”

59. 原子能机构“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”提供了一个论坛，使技术拥有者和使用者能够共同考虑革新型核能系统。自2001年设立以来，该项目的成员已发展到31个，这些成员占全世界国民生产总值的75%，占全世界人口的65%。2009年，该项目的活动被合并到五个新的实质性领域：利用“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”方法学开展核能系统评定；可持续核能发展的全球构想、假想方案和路径；核技术创新；制度安排创新；以及“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”核能创新对话论坛。

60. 2009年，白俄罗斯启用了新的核能系统评定。出版了九卷本的“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”方法学用户手册，并且该项目引进了“核能系统评定支持包”，其中包括培训、支助工作组访问以及对实施、分析和结果评价提供帮助。还印发了出版物《原子能机构能源系统规划和核能系统评定工具和方法学》和《发展中国家关于未来核能系统的用户通用考虑因素》。“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”完成了关于21世纪核能发展的全球假想方案和地区趋势的研究和关于可移动核电厂的法律和制度问题的研究。

61. “第四代国际论坛”通过签订系统性的合同和协议对2002年选取的六类下一代核能系统的研究活动进行了协调，“第四代核能系统技术路线图”将这六类核能系统描述为：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。但大多数正在进行中的各系统设计工作不是“第四代国际论坛”计划的一部分。“第四代国际论坛”目前有13个成员。¹⁰

⁹ 有关原子能机构先进裂变堆活动的更详细资料可见原子能机构最新年度报告的相关部分 (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>)。亦可参阅国际原子能机构《新的先进核电厂术语的说明》，原子能机构第936号技术文件（1997年）；《液态金属冷却快堆技术现状》，原子能机构第1083号技术文件（1999年）；《模块式高温气冷堆技术的现状与未来发展》，原子能机构第1198号技术文件（2001年）；《重水堆：现状和预期发展》，第407号技术报告丛书（2002年）；《国家加速器驱动系统分离和嬗变计划的审查》，原子能机构第1365号技术文件（2003年）；《先进轻水堆设计现状：2004年》，原子能机构第1391号技术文件（2004年）；《革新型中小型反应堆设计现状：2005年》，原子能机构第1485号技术文件（2005年）；《非厂内换料小型反应堆设计现状》，原子能机构第1536号技术文件（2007年）；《液态金属冷却堆：设计和运行经验》，原子能机构第1569号技术文件（2007年）；以及《水冷堆核电厂的先进应用》，原子能机构第1584号技术文件（2008年）。

¹⁰ 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。

62. 截至 2009 年底，以下九个“第四代国际论坛”成员签署了《第四代核能系统研究与发展国际合作框架协议》：加拿大、中国、欧原联、法国、日本、大韩民国、南非、瑞士和美国。该框架协议确定了“第四代国际论坛”的协作机制，即系统安排和项目安排。已为六个选定系统中的四个系统即气冷快堆、超临界水冷堆、钠冷快堆和超高温反应堆建立系统安排。2009 年，中国科学技术部加入超高温反应堆的系统安排，关于安全和运行问题的第四个超高温反应堆项目安排生效。

63. 原子能机构和“第四代国际论坛”开展合作，以避免重复和建立协同作用。这种合作包括原子能机构利用“第四代国际论坛”的经济评价模型“ECONS”估计气冷堆的成本以及“第四代国际论坛”利用原子能机构的核能产氢经济评价模型“HEEP”。“第四代国际论坛”还参加了原子能机构关于超临界水冷堆的传热性能和热工水力程序试验协调研究项目的合作。

B.1.2. 国际核能合作框架

64. “国际核能合作框架”最初是由美国于 2006 年作为“全球核能伙伴关系”而发起的。该框架包含以下内容：(1) 25 个一致认为有必要在世界范围内扩大核能的国家开展合作努力，(2) 美国实施一项旨在部署回收、燃料制造和反应堆技术以便清除乏燃料中的长寿命放射性元素的国内计划。虽然美国的这一国内计划在 2009 年中止，但国际合作努力仍在持续进行，其中，关于可靠燃料服务和基础结构发展的两个工作组以及指导小组在 4 月举行了会议；部长级执行委员会则于 10 月在中国举行了会议。作为转变的一部分，2010 年 6 月对这一国际合作努力的名称作了变更，以便扩大范围，增加参与。

B.1.3. 先进裂变的其他发展

65. 除“革新型核反应堆和燃料循环国际项目”、“第四代国际论坛”和“国际核能合作框架”外，一些国家、公司和合作伙伴还正在研究、开发和部署先进裂变堆。这些努力构成了全世界大部分先进裂变的工作并涵盖了一系列规模和应用的高温堆、快堆系统和改进型轻水堆。2009 年的发展在很大程度上是《2009 年核技术评论》¹¹中所述进展的继续，原子能机构即将在 2010 年印发的“国际核电状况与前景”的更新本将对此作更加详尽的叙述。

B.2. 聚变

66. 国际热核实验堆七个参项方（中国、印度、日本、大韩民国、俄罗斯联邦、美国和欧洲联盟）开展的国际热核实验堆基础设施和场址准备工作按计划取得了进展。场址准备已在 3 月完成。签署了价值约 15 亿欧元的设施采购安排，这约占预计采购总额的三分之一。

¹¹ 见 <http://www.iaea.org/Publications/Reports/ntr2009.pdf>。

67. 原子能机构和国际热核实验堆组织通过其正式合作协定¹² 已开始制订关于培训、人员交流、会议及聚变部件与装置出版物国际合作的计划。年轻聚变和等离子体物理学家在原子能机构的支助下继续参与在现有设施开展的聚变联合实验和随后的出版物编写工作，巴西的托卡马克界在 5 月组织了关于降低能量约束的托卡马克等离子体湍流现象的实验。

68. 在美国劳伦斯·利弗莫尔实验室的“国家点火装置”建设工作已经完成，并在 5 月举行了落成典礼。该装置拥有 192 个总能量约为 1.5 兆焦耳的激光器，这些激光器在“空腔”中产生辐射，以点燃氘-氚靶芯的聚变。9 月，在惯性聚变科学和应用国际会议上报告了有关激光束在空腔中的相互作用的初步结果。这些结果显示，“国家点火装置”随时都能准备启动对最终利用惯性聚变进行能源生产和更好地了解宇宙性质和演变都具有意义的物理学试验。

C. 原子数据和核数据

69. 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在数据的质量和完整性、数据的视频介绍和数据的全球分发方面继续得到改进。2009 年尤其值得一提的是就主要实验核反应数据库的质量保证开展的国际协作。推出了供用于快堆计算、中子剂量学和使用离子束进行材料分析的若干新数据库。用户从各合作中心网络服务器进行的检索数量在过去两年中每年增加约 10%。

70. 使用质子束和离子束的先进治疗规划和物理剂量学都依靠使用核数据作为重要输入的计算机模型（蒙特卡罗技术）。2009 年，两个新的离子束设施在德国和日本投入运行。10 多个放射治疗中心目前已处于后期建设阶段。在 2009 年国际离子束分析会议上，报告了离子束在分子成像及纳米粒子和纳米级装置研究、显微断层照相法和火星表面离子束分析中的新应用。

71. 关于核电，欧洲核工业范围内开展的努力侧重于验证新的“裂变和聚变联合编评数据库” 3.1.1 版，以便使之适用于对当前反应堆的安全分析和运行规划，并适用于对第四代反应堆设计的分析。关于聚变，出版了《利用欧洲活化分析系统-2007 计算的活化分析数据手册》，该手册凝聚了 20 多年与聚变装置有关的核反应堆数据研究结果。世界各地的数据库目前正在编辑对“国际热核实验堆项目”至关重要的原子数据和分子数据，特别是与涉及转换器和边缘等离子体区域的轻元素过程有关的数据。这些新数据库中包括有关激发、电离、复合和粒子碰撞过程的数据。

¹² 复载于可在原子能机构网站 <http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/2009/infcirc25a8.pdf> 获得的 INFCIRC/25/Add.8 号文件。

D. 加速器和研究堆的应用

D.1. 加速器

72. 有约 163 台低能静电加速器座落在 50 多个成员国，在五个成员国分布着九个散列中子源，有 50 个同步加速器光源座落在 20 多个成员国。全世界低能静电加速器的数量实际上保持不变，发达国家退休的静电加速器已被发展中国家用于核分析服务的新加速器所抵消。散列中子和同步加速器光源的数量正在以每 10 年若干台的速度增加。

73. 现代加速器用于医疗辐射物理学、辐射生物学、实验核物理学、农业、灭菌过程、材料研究、文化制品研究和环境保护。鉴于核科学和技术领域的人力资源挑战（见 A.4.3 节），小型加速器也在日益被纳入核科学和技术课程，以帮助发展学生的一般技能和特定专题方面的技能。例如，2009 年，加纳设立了国家加速器学院，以进一步加强制度能力，为研究和人力资源发展提供支持。特别是小型加速器，它提供获得实际知识和经验的机会，这种机会在较大的设施通常得不到。

74. 用于高能加速器的散列中子源靶件可提供加速器驱动系统包括为核废物嬗变和电力生产所设想的系统遭受辐射损伤的有用资料。2009 年，瑞士散列中子源“兆瓦级中试靶件实验”中曾在 2006 年被以 0.8 兆瓦的功率水平加以辐照的液态金属靶件开始被拆除。靶件的结构材料正在被拆开，分解为样品，供“兆瓦级中试靶件实验”的国际伙伴试验辐照材料的属性之用。获得的资料将有助于设计今后加速器驱动系统的长寿命、高功率靶件。

D.2. 研究堆

75. 研究堆可具有多种用途：核科学培训；核研究；材料试验；工业用和医用放射性同位素生产；以及硅掺杂、中子活化分析、宝石加工和无损试验等商业服务。它们可以是引入核电的国家计划中的一个步骤。随着对核能的兴趣日益提高，20 多个成员国目前正在考虑建设新研究堆。2009 年，“东欧研究堆倡议”联盟在原子能机构的支持下设立了一个团组进修培训班，以便向有兴趣启动第一个研究堆项目的成员国提供帮助。该培训班提供与研究堆的规划、评价、开发、建造、调试、利用、运行和维护有关的培训。

76. 全世界共有 240 多座正在运行的研究堆。2009 年没有新建研究堆进入调试。随着较老的反应堆退休并被数量更少但用途更多的反应堆所替代，在运研究堆的数量到 2020 年预计将降至 100 至 150 座。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和高效使用。合作网络还将有助于改进现有设施和发展新的设施。2009 年继续在建设这类网络（在地中海地区、东欧地区、加勒比地区和中亚地区）和关于残余应力和纹理分析的专题网络方面取得进展，但仍将需要广泛加强这方面的工作。

77. 美国“减少全球威胁倡议”为在将研究堆燃料和用于同位素生产设施的靶件从使

用高浓铀转换为使用低浓铀方面开展的一项主要努力提供了框架。2009年，该计划的范围从129座研究堆扩展到200座。到2010年4月底，全世界有72座一直使用高浓铀运行的研究堆被转换为使用低浓铀或在转换前被关闭，另外确定了33座其转换为使用现有合格的低浓铀燃料具有潜在可行性的研究堆。高性能研究堆将需要转换成使用开发中的新型高密度燃料（见下文第79段）。关于生产钼-99所用的靶件从使用高浓铀向使用低浓铀的转换，南非在2009年将“狩猎1号”反应堆完全转换为使用低浓铀，它成了第一个报告说也在将医用同位素生产靶件转换为使用低浓铀方面取得了实质性进展的大型钼-99生产国。

78. “减少全球威胁倡议”的“俄罗斯研究堆燃料返还计划”在2009年取得显著进展。从匈牙利、哈萨克斯坦、利比亚、波兰和罗马尼亚向俄罗斯联邦运回了约270千克高浓铀乏核燃料和49千克新鲜高浓铀核燃料。该计划自开始实施以来已经成功地向俄罗斯联邦返还了近1350千克高浓铀，包括新鲜核燃料和乏核燃料。

79. 高通量和高性能研究堆的转换需要目前正在开发的超高密度先进铀-钼燃料。过去五年在这方面已经取得了显著的进展。由于辐照过程中在燃料和铝基体之间形成的反应层膨胀，导致遇到了重重困难。一个包括阿根廷、比利时、加拿大、智利、法国、德国、大韩民国、俄罗斯联邦和美国在内的国际燃料开发工作组正在协作调查铀-钼燃料的行为和性能。在美国，努力的重点是开发供高通量研究堆使用的块状铀-钼燃料。随着制造技术的成熟，正在取得显著的进步。欧洲在2009年加强了一项新倡议，目的是使超高密度低浓铀弥散性铀-钼燃料达到欧洲高通量研究转换使用低浓铀的要求。

80. 虽然2009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，以实现超高密度合格低浓铀燃料的及时商业供应。

E. 粮食和农业领域的核技术

E.1. 改进牲畜的繁殖力和健康¹³

81. 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）已确定将动物遗传资源分析作为一个高度优先领域，因为这种分析为畜牧生产的可持续发展和加强粮食安全提供了至关重要的方案。在原子能机构的支持下，在牛、绵羊和山羊品种的基因多样性分析方面取得了重要进展，目的是改进对理想高产动物的甄选，因为动物抗地方病或恶劣环境的能力在许多情况下与其遗传构成有关。这些遗传分析的数据和结果对于确保今后牲畜育种计划的可持续性和甄选携带适宜基因动物的能力

¹³ 可在最新年度报告相关部分（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>）或在 <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/Agenda/index.html> 网址上获得更多资料。

都很有价值。但在将从这些分析获得的遗传数据用于动物育种计划的能力方面存在着显著差距，特别是在发展中国家尤其如此。为此，开发了一个计算机网络系统界面，以期向所有成员国提供使用这些遗传数据，以及提供对实验室方案、基因分析的标准操作程序、基因组研究工具和牲畜分子标志物数据库¹⁴的使用。已经从 89 个品种的 4000 多只绵羊和山羊身上获得了基因组数据和表型数据。将利用这种数据确定可用于改善动物繁殖的共同基因。

82. 放射性标记核苷酸探针促进了全序列牛基因组的测序¹⁵。这些手段为甄选具有较少环境足迹的更高能效动物特别是产生较少温室气体排放的动物提供了一种工具。这一发现可能导致更高效的肉奶生产，并提供有关哺乳动物进化以及牛特定生物学的新信息，还为可能导致在全球人口增长带来挑战的世界上更加可持续地进行粮食生产的研究工作指明了方向。



图 E-1. 缅甸本地抗寄生性疾病并充分适应当地环境的山羊，这是利用核技术开展基因组绘制活动的组成部分。

83. 利用与现代生物工艺学结合的核技术及早和快速诊断牲畜疾病对于努力限制其对动物和人类的影响以及改善粮食安全都至关重要。在动物疾病病原体引发疾病之前，可以利用核技术的高敏感性和专一性以及现代生物工艺技术来具体探测这些病原体，以追踪动物遗传指纹以及表征影响动物和人体健康的微生物。例如，核分子技术使得

¹⁴ 小型反刍动物的数量性状位点/基因/脱氧核糖核酸序列表征实时数据库的发展 (http://www.intl-pag.org/16/abstracts/PAG16_P08a_852.html)。

¹⁵ 牛基因组测序和分析协会，Christine G. Elsik、Ross L. Tellam 和 Kim C. Worley，“牛磺酸的基因组序列：反刍动物生物学和进化的一个窗口”，《科学》，2009 年 4 月 24 日，第 324 卷第 522 页至第 528 页。

能够在一天时间内对禽流感和猪流感进行确定性诊断，而这两种疾病的传统诊断方法可能长达一周时间。

E.2. 虫害防治

84. 在虫害防治领域，核技术的使用并不局限于作为昆虫不育技术大面积应用组成部分的 γ 辐照昆虫不育应用和相关的遗传控制方法，而是还包括利用同位素研究昆虫生物学、行为、生物化学、生态学和生理学。原子能机构还一直参与旨在解决虫害问题的放射性核素用于昆虫学研究的工作。1992 年重新编辑和印发的原子能机构《核技术用于虫害研究和防治的实验室培训手册》是原子能机构在这一领域做出的一个重大贡献。20 世纪 90 年代中期以来，全球科学和社会环境发生了显著变化。从环境的角度，随昆虫向野外释放放射性核素不再是可接受的。此外，由于安全考虑，在实验室使用放射性核素变得越来越昂贵。

85. 稳定同位素方法是许多放射性核素方法的一种替代方法。这类同位素没有放射性，在环境中自然地普遍存在，而且工作人员在处理这类同位素时不会面临任何不利的健康风险。由于要处理的安全考虑因素很少，就不需要制订有关建筑物和设备的专门条例。这些因素均有助于降低成本和促进稳定同位素的应用，并有助于向环境安全释放用这类同位素标记的昆虫。

86. 2009 年，原子能机构和粮农组织出版了《稳定同位素在昆虫学中的应用手册》，其中介绍了稳定同位素科学的基本原理和技术，并评述了稳定同位素在昆虫学研究中的应用。过去 25 年来，同位素比质谱测定法在检测、精度和自动化方面的进步大大地拓宽了实验可能性。生物圈中的自然过程导致产生了独特的同位素信号，因此，稳定同位素在昆虫学研究中非常有用，可解答许多生物学和生态学问题，如昆虫移动踪迹、食物链中的饲养方式、营养和精子转移情况以及解答有关资源使用的具体问题。

87. 另一方面，使用稳定同位素的主要劣势之一是同位素比质谱仪的基本建设费用。此外，这种设备需要一个控温环境和有技能的工作人员来维护和保养敏感的仪器仪表。这些问题可通过将同位素分析转包给商业分析实验室加以克服。目前有许多实验室按样品付款的方式提供同位素分析服务，而且在世界范围内运输稳定同位素样品也简单、安全和价格低廉。

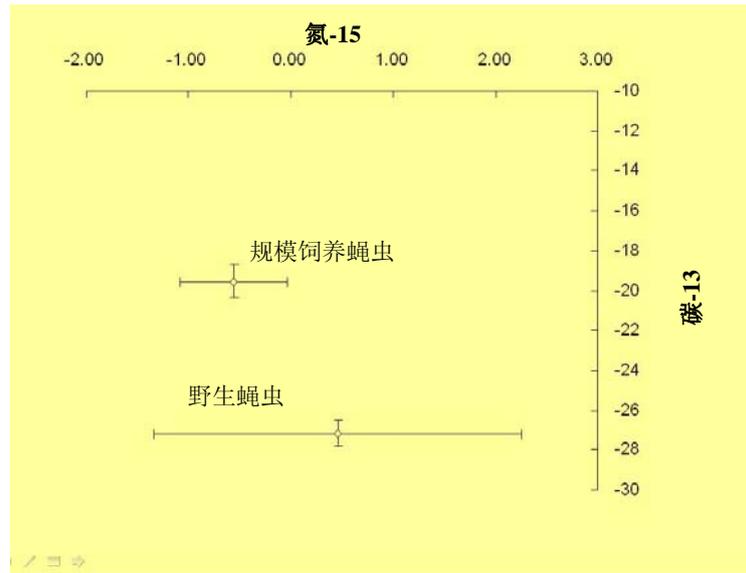


图 E-2. 稳定同位素特征可用于鉴别所释放的实验室规模饲养的蝇虫和野生蝇虫，以作为实施昆虫不育技术计划的一部分对害虫种群进行监测。图中数字示出了野外地中海果蝇雄蝇与规模饲养设施地中海果蝇雄蝇的平均同位素特征；竖短线系偏离平均值的正/负标准偏差。

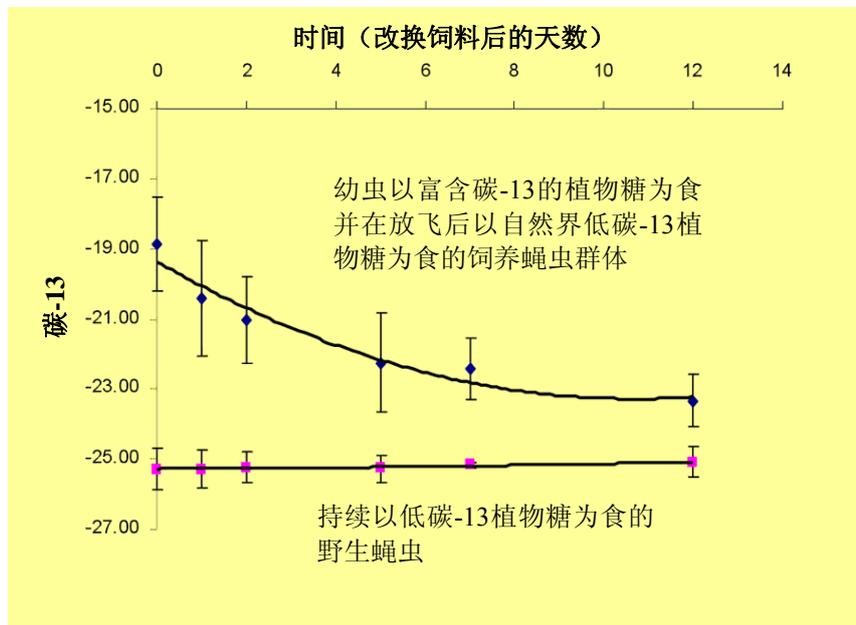


图 E-3. 规模饲养蝇虫的同位素特征在其一生中持续存在，即便这些蝇虫在从含碳-13高的幼虫饲料改为模拟昆虫不育技术实践的含碳-13低的成虫饲料的当天被释放亦如此。有可能以99%以上的把握鉴别不育蝇虫与野生蝇虫。

E.3. 食品质量和安全

88. 食品辐照是防治微生物包括那些造成一系列食物传播疾病微生物的一种有价值的技术。食物传播疾病的爆发与各类食物都有关联，病原体能够从产品操作、加工和制备过程中的不同污染源进入食物。

89. 由于延长加热并非处理所有食品的适当方式，食品辐照就成为食品加工和处理的一种替代方案。辐照技术的显著优势之一在于它能在不显著提升温度的情况下摧毁微生物。辐照可应用于新鲜蔬菜、水果和冷冻食品，而不显著改变其味道或结构。辐照还可用于处理传统煮熟并经包装以备向消费者销售的食品。辐照的另一个优势在于它能够摧毁食物腐败产生的有机体，从而有助于肉、禽和海产品的较长期保鲜。

90. 以前在辐照食品方面进行的大多数研究和开发活动都侧重于加工简单的商品以供大众消费。但最近的发展表明，对应用食品辐照实现极高水平的微生物学安全有着潜在的需求，这针对的是对饮食中的微生物非常敏感并需要可靠供给安全和有益健康食品的特定目标消费人群。例如，免疫系统受损者对食物载带细菌特别敏感，由此往往限制了他们能够食用的食品的范围。为了满足医学界的苛刻要求，可通过利用辐照研究和开发出一系列用于特定饮食目的的辐照食品。



图 E-4. 由于细菌爆发，美国食品和药品管理局最近批准了对菠菜的辐照。

91. 食品辐照进一步应用的今后步骤是与适合于范围广泛的食品的其他食品加工技术相结合开发和改进辐照技术。特别是，这些食品必须适合于对极高水平的食品卫生有

需求的特定目标人群的消费。将继续单独或与其他食品技术结合利用辐照应用来开发安全食品并进行营养学、微生物学和可接受性试验，从而为改善人类健康作出贡献。

E.4. 作物改良

92. 在利用突变诱发进行作物改良和支持基础研究方面出现复兴势头。正在开发的两项新技术是使同位素在细胞内衰变的离子束注入技术和宇宙射线透过细胞的太空（地球大气圈以外区域）育种，以补充在作物突变育种中使用的其它技术。在世界范围内，来自 170 个不同植物品种的正式推广用于商业生产的突变品种的数量正在稳步增加并接近 3100 种¹⁶。同时，用于诱变处理的新设施如离子束注入装置、 γ 射线人工气候室和 γ 射线温室等也正在亚洲一些国家建造和用于突变育种。

93. 与此同时，在快速和大规模探索发展不同类型诱发突变新技术的过程中，新的前沿学科正在交叉出现。在分子级上，正呈现出开发与现代生物技术相结合的一揽子技术的趋势，如利用突变诱发的高产筛选技术和下一代测序技术等。正如目前正在澳大利亚高分辨率植物表型组学中心所开展的那样，基于自动图像分析工具的系统、高产、表型筛选技术和机器人设施能够处理非常大的突变体收集量（即 1 万至 10 万个已完全表型的植物），并填补所谓的“表型/基因型空白”。这种类型的筛选至关重要，因为它能使植物育种人员高效地确定具有即便在不利条件下亦能增产之特征的有价值的突变品系。找到一种能够填补可得突变体资源与全部植物表型之间缺口的方式非常重要，以便利用包括调查中的主要作物在内的植物生物多样性的全部潜力。通过基于基因的突变育种来提高效率能够有助于提高作物品种的质量和可利用性，从而增加粮食供给并进而使粮食价格能够得到急需的降低。目前有可能以低收入国家能力所及的经济成本对基因组进行测序。

E.5. 可持续的水土管理

E.5.1. 利用同位素方法改进农业用水管理

94. 作物生长可利用的土壤水取决于裸露土壤水流失（即蒸发）和植物叶蒸腾的程度。为了提高灌溉水的利用效率，必须对这两部分的水流失情况进行量化。但由于与降水密度、土壤水状态、植物根系深度和土地覆盖等其他因素之复杂的相互作用，在野外规模上很难对蒸发和蒸腾作用加以准确量化。水中稳定同位素（氧-18 和氢-2）可有效地用于揭示这类相互作用，因为它们是水在土壤-植被-大气连续统一体内移动的天然示踪剂。土壤蒸发导致土壤水同位素组分富集氧-18 和氢-2。与之相比较的是，植物蒸腾并不影响土壤水同位素组分。最近在半干旱草地、松柏林和耕作系统成功地开展了利用稳定水同位素技术量化蒸发和蒸腾作用的研究工作。所获得的信息将用于开发技术软件包和模型，以改善不同环境下的水土管理。

¹⁶ 见载于 <http://mvgs.iaea.org> 上的突变品种和遗传材料数据库。



图 E-5. 利用常规技术和同位素技术测量玉米田中土壤蒸发作用和植物蒸腾作用（图片由梅旭荣教授提供）。

E.5.2. 土壤有机碳整合和气候变化缓解

95. 土壤有机碳整合具有降低不断增加的大气二氧化碳水平和缓解气候变化的潜力。通过光合作用，植物利用二氧化碳生长。在植物死亡和分解时，植物中的一些碳在土壤中被整合为土壤有机碳。虽然在评定土壤有机碳方面已经取得了显著进展，但仍未完全了解土壤中土壤有机碳流量的控制和调节机制。特别是，土壤有机碳整合与土壤氮和磷之间存在的联系尚没有充分确定。通过利用放射性碳同位素（碳-14）和稳定碳同位素（碳-13）并结合土壤碳分馏和中型实验生态系统（土壤整段标本）技术，发现氮和磷的存在对于确定土壤有机碳整合能力范围和土壤有机碳在具有不同碳汇潜力的不同土壤碳库中的分配均起着至关重要的作用。为了改进作为减缓气候变化一种手段的急需的土壤有机碳整合模型，有必要在土地恢复对于可持续粮食生产越来越重要的农业生态系统中因应氮和磷的变化对土壤有机碳整合作用做出评定。这方面的信息非常重要，以便农业问题能够在今后的碳贸易机制和减少碳排放中得到考虑^{17, 18}。

¹⁷ 亦见《放射性碳和土壤碳动力学》，S. Trumbore 著，（2009 年），《地球与行星科学年评》第 37 期，第 47 页至第 66 页。

¹⁸ 《在实验中型生态系统中跨氮和磷沉积梯度的非线性根驱碳整合作用》M. Bradford、N. Fierer、R. Jackson、T. Maddox、J. Reynolds 著，（2008 年），《全球变化生物学》第 14 卷，第 1113 页至第 1124 页。

F. 人体健康

F.1. 利用核技术抗击营养不良

96. 微量营养素缺乏症这种“隐性饥饿”影响着全球大量人口，特别是发展中国家的婴幼儿和育龄妇女。缺乏维生素 A、锌和铁是主要的公众健康问题，因而会造成生命初期阶段的生长和认知发展受到损害，并引起儿童健康状况不良。

97. 迫切需要制订出有效的、可持续的、基于食品的战略，以抗击微量营养素缺乏症。基于食品的战略包括食品强化和饮食改变等常规干预方法，同时也包括营养改良型主食等更具创新性的方案，即“生物强化法”。作为制订和评价抗击微量营养素缺乏症的营养干预措施的组成部分，核技术被用来评价微量营养素的生物利用率。

98. 最近利用稳定同位素技术评定弱势群体对铁和维生素 A 类胡萝卜素的生物利用率的结果将有助于决策者、保健专业人员和其他利益相关者包括食品工业和作物育种者确定前行的道路。例如，正如世卫组织和粮农组织最近制订的导则¹⁹中所强调的那样，抗击铁缺乏症的食品强化战略的总体影响将取决于铁化合物的生物利用率以及饮食中是否存在影响铁吸收的抑制剂和增强剂。



图 F-1. 发展中国家的婴幼儿和育龄妇女是处在“隐形饥饿”危险中的最弱势群体（图片由埃塞俄比亚 Stephanie Good 提供）。

99. 用于估计维生素 A 总量的稳定同位素技术目前被用来提供关于富含维生素 A 类胡萝卜素的橙色果肉甘薯生物价值的新资料。²⁰ 原子能机构在该领域以及在高锌小麦等

¹⁹ 世卫组织和粮农组织《微量营养素食物强化指南》，Allen L, De Benoist B, Dary O, Hurrell RF 主编，<http://www.who.int/nutrition/publications/micronutrients/9241594012/en/index.html>。

²⁰ 见 <http://www.harvestplus.org/content/biofortified-foods-offer-protection-vitamin-deficiency>。

其他生物强化稳定作物的评价方面与“生物强化”计划（HarvestPlus）等国际伙伴密切合作。²¹

100. “哥本哈根共识”2008年最新报告²²突出强调了上述努力的重要性。世界上最著名的经济学家八人小组对所提出的基于经济成本效益的全球挑战解决方案进行了等级评定。在解决营养专家提出的10种不同挑战的30种方案中，抗击微量营养素缺乏症的解决方案即补充、食品强化和生物强化被评为第一、第三和第五。

F.2. 混合成像的单光子发射计算机断层照相法/计算机断层照相法（SPECT/CT）以及正电子发射断层照相法/计算机断层照相法（PET/CT）²³

101. 诊断成像是最具创新性的现代医学领域之一。它可以分为两大类：十分精确界定解剖细节的模式和产生功能图像或分子图像的模式。第一类的例子包括CT和磁共振成像法（MRI），它们能确定小到毫米的结构性改变。PET和SPECT是第二类的例子，它们对疾病的调查能达到分子级。

102. 在过去的10年中，技术的发展已使得能够将解剖和功能模式合并到SPECT/CT和PET/CT等混合成像系统中。这些混合成像系统能有助于开展对解剖学和人体器官活动的合并调查。其临床上的好处很多，其中包括能更好地确定和定位损害部位，并能对已确定损害范围内结构上和代谢方面的变化进行更好的表征。其结果是能在疾病的最初阶段以较精确的方式对其进行检测，从而实现早期治疗以及最大的彻底康复机会。混合成像技术已在心脏病学和癌症方面得到成功应用。PET/CT被用于对冠状动脉梗阻中可能导致组织坏死的血流损害进行评价。在肿瘤学领域，混合成像技术使得能对癌症进行早期检测，同时远在解剖学上的变化出现之前就能证实细胞一级发生的变化。在整形外科领域，SPECT/CT和PET/CT是调查腰痛的最佳成像模式，而且还可用于术后和创伤后两种情形。混合成像技术的其他应用领域包括对影响脑、甲状腺、甲状旁腺和人体任何其它器官的良性疾病进行评价。

²¹ 见 <http://www.harvestplus.org/content/study-shows-women-absorb-more-zinc-biofortified-wheat>。

²² 见 <http://www.copenhagenconsensus.com/The%2010%20challenges-1.aspx>。

²³ 可在最新年度报告相关部分（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>）或在 <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/Agenda/index.html> 网址上获得更多资料。

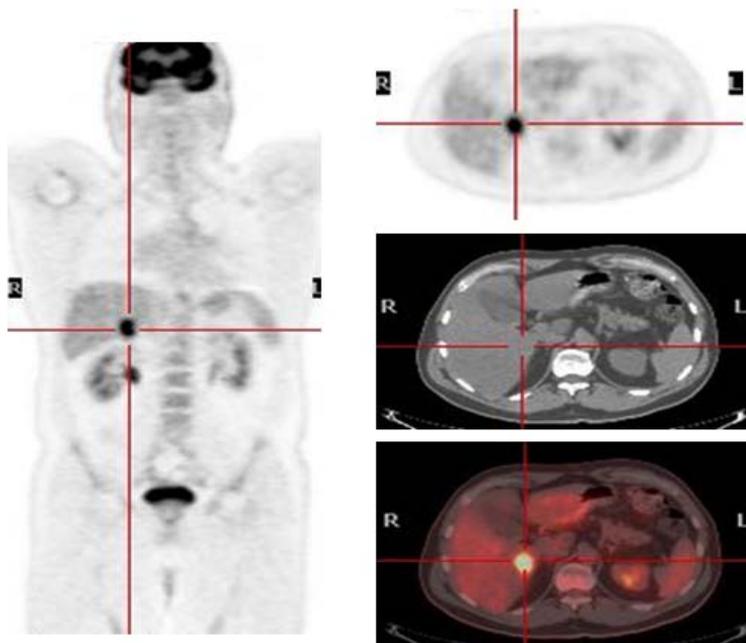


图 F-2. 图像对于监测疾病的发展情况不可或缺，上图是一名患有并经过外科手术切除结肠癌的 50 岁男子的内脏图像。浅色区域显示的是由于可能的肿瘤复发而在肿瘤标志物中出现的一处隆起。PET/CT 显示的是没发生任何其他损害的单发肝脏转移肿瘤，表示可以通过新手术将其切除（图片由 S. Fanti 提供）。

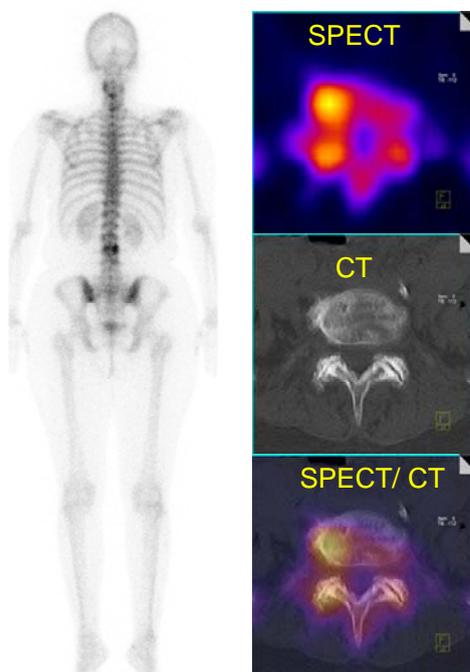


图 F-3. 利用 SPECT 的一项研究显示这名曾患有黑色素瘤的 65 岁妇女的腰椎和颈椎柱增强了骨代谢。SPECT 和 CT 共同显示的图像表明骨骼在解剖学上的巨大变化与衰退过程有关。可以排除骨转移肿瘤。

F.3. 辐射肿瘤学应用方面的进步

103. 2009 年，辐射肿瘤学领域出现了若干新的技术发展情况。2009 年 4 月的原子能机构辐射肿瘤学的进步国际会议就突出强调了这一点²⁴。

104. 第一个重要问题涉及为评定钴装置与直线加速器的比较价值所作的努力，因为这对于中低收入国家尤为重要。在辐射肿瘤学的进步国际会议期间，以及随后在原子能机构开展的对人体健康领域的核技术的比较评定过程中，专家一致认为，在这两种处理方式之间的选择将取决于若干因素，其中包括：是否制订有国家癌症防治计划；是否存在所需的合格科学和医学工作人员的骨干队伍；是否建立有适当的基础设施。

105. 其次，由于治疗技术变得日益复杂，而且正在利用更大的剂量来提高癌症治愈率，因此，在全球范围内，辐射肿瘤学的不确定性和准确性问题正变得越来越重要。人们日益了解到，患者治疗之路的每一步都需要有质量保证活动和准确的文件记录。正在鼓励制订循证临床导则和方案。

106. 为了确保临床实践有可靠的科学证据支持，人们开始越来越仔细地审查出现的新技术，如调强放射疗法、图像引导放射疗法以及利用质子和带电粒子。这无论对于中低收入国家还是对于高收入国家都十分重要，因为资源是有限的，而且成本效用措施越来越具有相关性。

107. 由于削减费用的努力以及利用技术上先进的设备提高了施用高辐射剂量的准确性，采用“低分割治疗时间表”的做法也在经历一个复苏期。

F.4. 数字技术对放射性 X 射线成像的影响

108. 数字技术的进步促进了 CT 应用的增加。例如，快速广域多层 CT 的使用将其使用范围扩大到从心脏病学到儿科研究的大范围应用。这种新技术随之带来的是不断增加的辐射剂量，并对我们既有的剂量测定实践提出了挑战。放射性诊断是对有效保健至关重要的一个医学领域。世界上平均每两人就有一人每年进行一次放射学检查。图 F-4 显示 X 射线放射学检查的数量过去 20 年增加了一倍以上（基于辐射科学委的数据）。服务的地域分布存在显著的不均衡，低收入国家开展的检查实际上不到世界检查总数的 2%。当今放射学的另一个显著不同的特点是技术变化的速度，具有从模拟图像如胶片向数字成像技术急剧转变的特点。

109. 对低收入国家而言，数字技术随之带来的既有出乎意外的机遇，也有各种挑战。令人遗憾的是，许多发展中国家仍然几乎完全依赖通过手工冲洗胶片取得诊断用图像。这一方法在技术上具有挑战性，常常导致图像质量低劣。该方法还有害于环境。但尤其招致批评的是，在放射性设备和熟练技工缺乏的地方，这种处理方法可能限制有效提供服务。数字化医学图像可以通过电子方式远程传输，从而使偏远或资源有限

²⁴ 欲了解更多情况，请见 <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/Announcements.asp?ConfID=35265>。

的地区能够利用杰出中心的专家诊断，并有助于开展专业培训。随着该技术的成熟以及费用的进一步削减，数字成像技术似乎越来越达到发展中国家财力可承受的程度。数字技术的继续改进有望在未来替代手工冲洗胶片图像，从而带来更高效和更广泛使用放射性服务的希望。

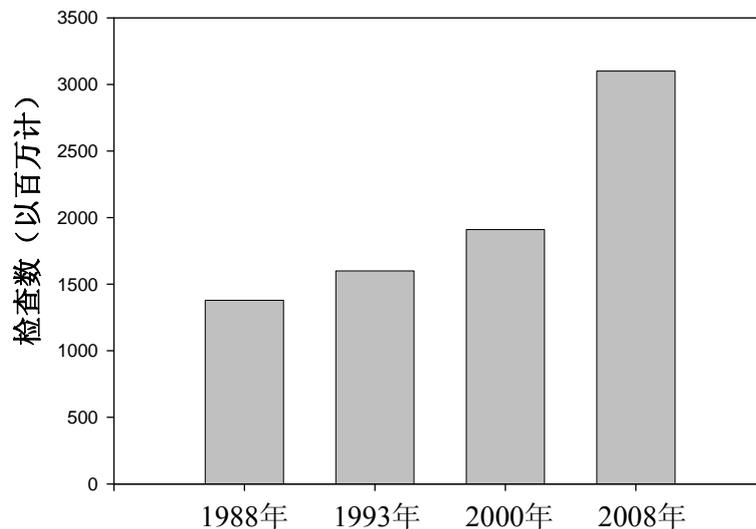


图 F-4. 全球 X 射线放射学检查趋势（辐射科学委的正式记录，2008 年）。

G. 环境

G.1. 核技术用于海底地下水露头的量化²⁵

110. 水从大陆上的河流和含水层流向海洋。如含水层与海岸线相交，则向海洋释放淡水。这种海底地下水露头的估计数量相差很大，占排入沿海水域淡水总量的 6%至 100%，这主要是海底地下水露头的区域和时间差异所致。最近，由于其作为淡水资源在缺水地区的潜力，海底地下水露头受到了海洋管理领域的极大关注。此外，若海底地下水露头由微咸水构成，则可由海水淡化厂加以利用。另一方面，海底地下水露头中也可能含有大量的污染物（微营养素、金属、农药），从而对沿海生态系统造成影响。这可能导致有害藻华爆发和沿海地区污染。最后，作为一种管理工具，对海底地下水露头数量的了解有助于防止对沿海含水层的过度利用和防止盐水浸入。

²⁵ 可在最新年度报告相关部分（<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>）或在 <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/Agenda/index.html> 网址上获得更多资料。

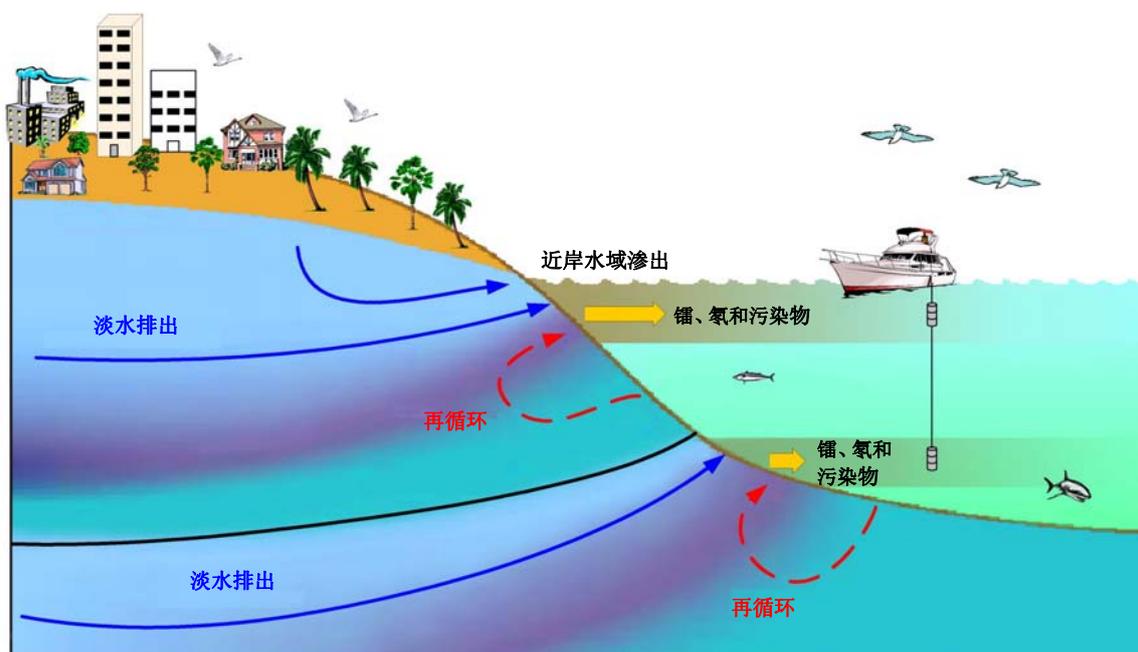


图 G-1. 海底地下水概念图示。水文梯度导致淡水排向海洋。例如受潮汐驱动的海水再循环促进了海底地下水露头。

111. 开发了镭和氡测量技术，以探知沿海地区的海底地下水露头和对其进行量化。²⁶ 与海水相比较，海底地下水露头中富含镭和氡这两种放射性元素。通过测量沿海水域镭和氡的空间分布，可探知海底地下水露头的源头。根据主要因潮汐引起的海底地下水露头和海水的混合所造成的其在时间上的变化，可以确定海底地下水露头的数量。此外，确定四种镭同位素（镭-223、镭-224、镭-226 和镭-228）有助于了解海底地下水露头在沿海地带的散布和混合时段。鉴于氡和镭作为海底地下水露头示踪剂在使用上的便利，预计它们的使用在处于环境压力下的沿海地区将会增加。

G.2. 了解碳循环：应用核技术评定从海洋到海底的粒子通量

112. 海洋生物地球化学领域一个基本且悬而未决的问题是了解如何控制和加强物质从海洋表面向海底或海洋深处通量的机理。海洋是一个主要的碳汇，数量越来越多的二氧化碳的滞留正在引起海洋的酸化。“沉降粒子”是最终将碳和其他元素及污染物从上层海水移除的机制。这包括通过粒子沉降从二氧化碳转化为生物质能和被深海接收的大气二氧化碳以及染污物和放射性元素。通过分析来自各种海洋深度的悬浮颗粒物，可评定控制着碳从海洋表面向海洋深处迁移的各种因素。

113. 这些沉降粒子是将碳从海洋表面输出至海底的主要媒介。随着这些粒子沉降到海底，它们所具有的有机碳重新矿化为无机形态，这更易于释放和重新分布到不同深度

²⁶ 另见《核和同位素技术用于表征沿海地带海底地下水露头》（原子能机构第 1595 号《技术文件》，2008 年）。

的海水中。这种重新分布的程度决定着海洋能够从大气中吸收多少二氧化碳。天然放射性核素钷-234 在过去几年中被越来越多地用于进行公海和沿海环境中上层海水粒子通量和碳输出量的量化。钷-234 是一种粒子活性同位素，是由其溶解守恒母铀即铀-238 的放射性衰变在海水中产生的。铀-238 和钷-234 的测量总活性之间的不平衡反映数日至数周时间里从海洋表面的净粒子输出率。

114. 在北冰洋沿海的一个国际项目最近利用这一技术评定了气候变暖所致永久冻土融化的影响以及因此导致的有机物通过河流从沿海向开阔水面的流出量增加情况。



图 G-2. 正在部署原地大型泵，以便收集用于测量北冰洋水域放射性核素的颗粒物。

H. 水资源

115. 第三次联合国“世界水发展报告”²⁷ 和 2009 年在伊斯坦布尔举行的“第五届世界水论坛”都强调了在日益变化的世界中与水有关的关键领域。作为影响人类社会和生态系统可持续性的一个关键因素，气候变化对水资源构成的威胁、不断上涨的粮食和能源费用以及全球经济危机使解决水问题变得更加紧迫。

116. 因此，加强世界有关机构间的合作对处理水和其他因素之间的联系至关重要。原子能机构目前正在通过其水资源计划处理这些联系。同位素水文学为解决复杂的水问

²⁷ 第三次“世界水发展报告”（教科文组织，2009 年）：<http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr3/index.shtml>。

题提供了独特的工具，并有助于管理人员和决策者一方面了解能源和粮食生产之间的密切关系，另一方面了解水资源的利用。粮食和能源都对水资源的可持续性有着主要影响，而水供应将对能够在何种程度上满足日益增长的粮食和能源需求产生重大影响。有多种因素影响水资源或水资源的缺乏和受水资源或水资源缺乏的影响，图 H-1 所示水和政治、经济、社会和环境因素及压力之间的联系表明需要进行综合水资源管理和综合规划。

117. 缺乏对当地和全国水文系统和水循环的了解经常阻碍着有效和可持续的水管理。同位素水文学形式的核方案有助于解决这种不足，与传统水文学监测方案相比，这种方式获得关键资料的速度可能要快得多。

118. 由于最近开发的激光光谱测定分析仪被扩大用于测量水同位素，利用同位素技术评定水资源正在越来越便利。原子能机构在评定该技术的性能方面发挥了至关重要的作用，目前正在协助成员国采购分析仪以及向技术人员提供培训。这些仪器比 20 世纪 40 年代以来经常使用的同位素质谱仪更便宜和更易于使用。因此，该技术可使越来越多的水资源专家和小组得以利用同位素工具评定水资源。这一激光技术的使用预计在下一个 10 年中将呈指数增加。

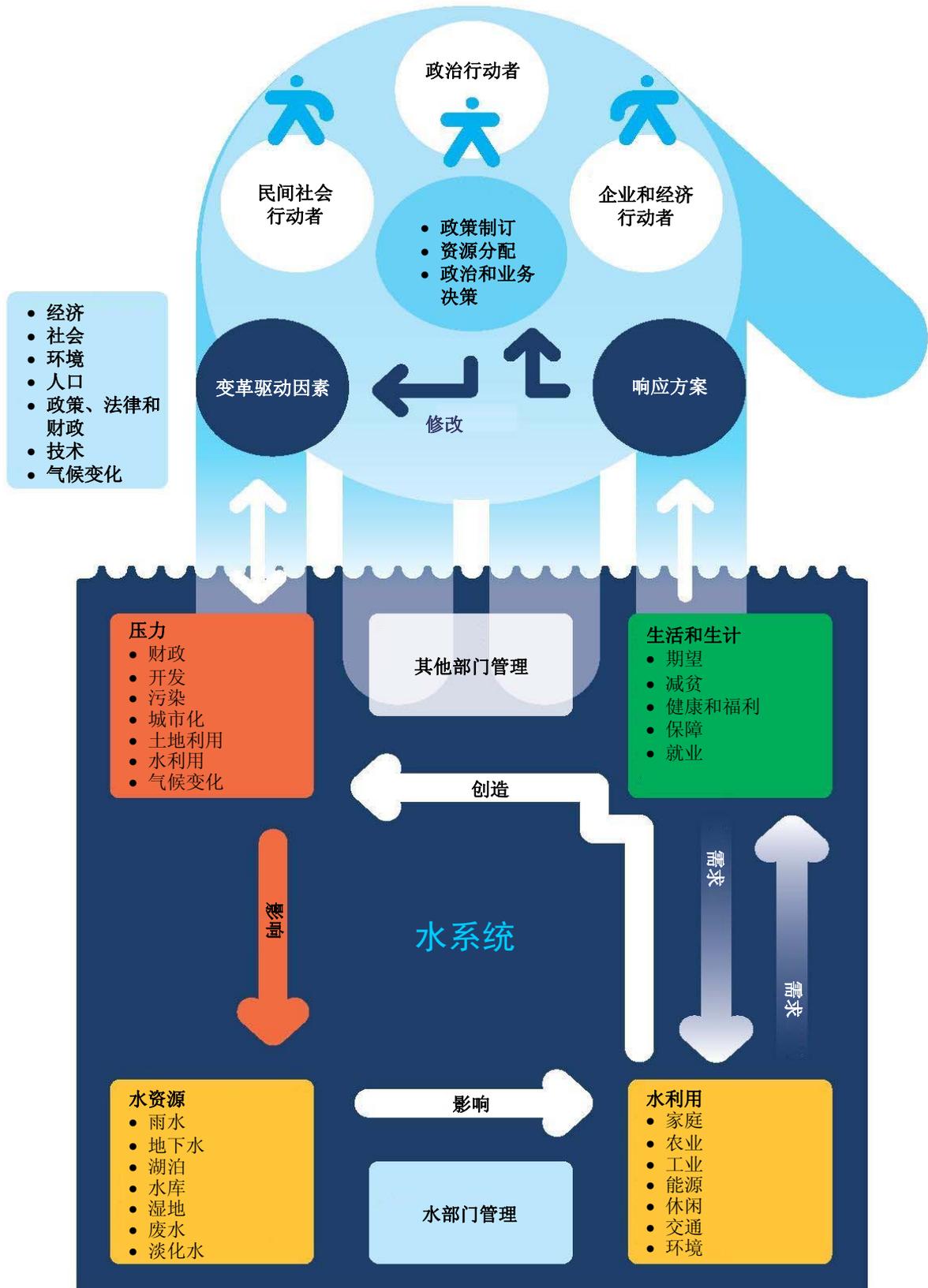


图 H-1. 影响水资源可持续性的社会、政治和经济因素及过程（来源：联合国“第三次世界水发展报告”，2009年）。

H.1. “先查明情况，后采取行动”

119. 在其发出的关键信息中，第五届“世界水论坛”通过其主题“消除水问题上的分歧”强调了“先查明情况，后采取行动”的理念（即需要充分了解特定水文系统是如何运作的，以便随后采取适当的管理行动）。为适应或减轻气候变化的影响，必须首先了解当前条件下特定水资源的状况和运作。第五届“世界水论坛”²⁸提出了三项与应用核技术有关的重要建议。

- 更好地了解全球变化对水资源、自然水文过程和生态系统的影响；
- 需要制订、执行和加强有关旨在预先考虑及应对全球变化的可能影响的跨国、国家和（或）地方计划；
- 需要对水领域的可持续利用和管理研究给予更大的支持，并应促进国际机构之间的合作。

H.2. 利用稳定同位素了解地下水的供应和质量

120. 稳定同位素方案越来越多地被用于了解影响当地和全球地下水供应和质量的各种过程的空间分布情况。图 H-2 显示了这种方案。所示墨西哥洛斯纳兰霍斯地区地下水氧-18 数值图显示了西北部研究区（蓝色部分）高海拔补给的重要性和其他地区（红色和橙色部分）低海拔地表水渗入的影响。这种资料为评定气候变化和其他因素对当地地下水资源的影响提供了一个关键基准。

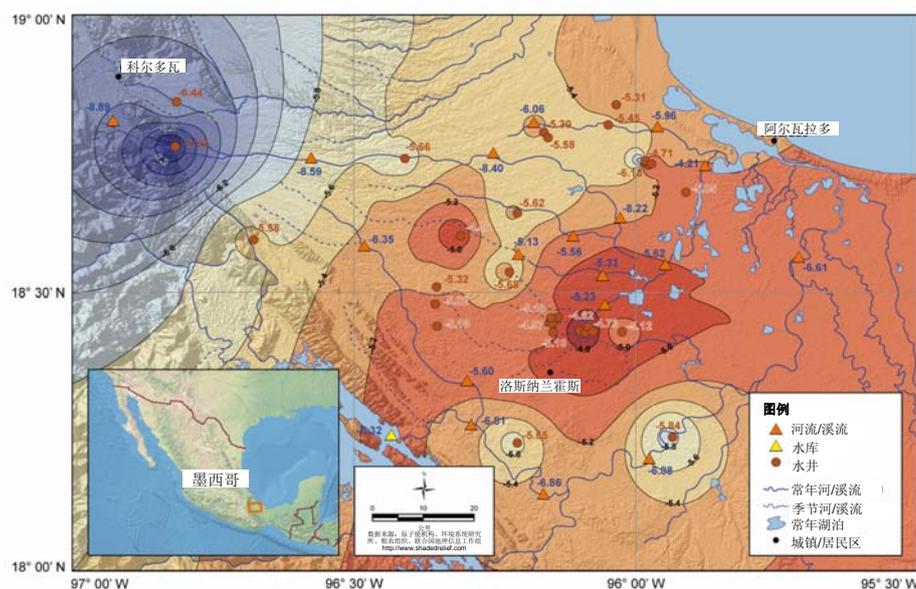


图 H-2. 墨西哥洛斯纳兰霍斯地区的氧-18 地下水数值概图。较低的同位素负值（左上蓝色部分）表示高海拔补给。红色和橙色部分表示低海拔补给和混合所作的贡献。

²⁸ 见 <http://www.worldwaterforum5.org/>。

121. 由于同位素水文学有助于改进水资源评定，因此，它还在能源规划中发挥着作用。与原子能机构水资源计划的工作人员一道，粮农组织/原子能机构粮农核技术联合处水土管理和作物营养科和核能司规划和经济研究科正在合作实施一项与气候、土地、能源和水规划有关的倡议。如能成功制订一项方案，它将被用于协助成员国评价包括经济、社会、环境、人口、政策、法律、财政、技术和气候等领域变化在内的广泛问题的综合影响。气候、土地、能源和水规划还将促进政府各部门和各机构合作制订关于可持续水和能源发展的综合解决方案。

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. 放射性同位素产品及其供应

122. 2009 年，由于所面临的医用同位素特别是裂变产生的钼-99 供应严重短缺，对医用和工业用放射性同位素日益增长的需求以及相关技术的进步受到了全世界的关注。研究堆生产的放射性同位素继续成为医疗和工业应用的支柱，而回旋加速器的生产能力也继续提高，这主要由于建立了生产半衰期很短的放射性同位素的 PET 地区中心所致。2009 年举行的三次大型国际会议对放射性药物开发方面的上述进步和最近取得的其他进步作了反映。²⁹

123. 从专为生产 PET 示踪剂而安装的回旋加速器数量中明显可以看出，人们对使用 PET 和 PET/CT 的兴趣越来越大。据估计，全世界目前约有 650 台回旋加速器和 2200 个 PET 系统在运行。临床使用中处于支配地位的仍然是氟-18 标记氟化脱氧葡萄糖对癌症患者的成熟使用，同时也越来越侧重于应对开发和使用其他 PET 放射性药物的挑战和要求。锗-68-镓-68 发生器可利用性的提高和 PET 中心数量的日益增多促进了锗-68 基放射性药物包括相关自动化合成模块的开发工作。利用寿期相对较长的 PET 放射性同位素对涉及较长时期的生物学过程和分布进行某些调查的想法已导致许多中心探讨利用现有医用回旋加速器富余运行时间生产 PET 示踪剂如铜-64 和碘-124 产品的可能性。对这些产品感兴趣的另一个原因是它们作为向利用类似治疗用放射性同位素的治疗应用提供剂量测定数据精确手段的作用。

²⁹ 在加拿大多伦多举行的核医学学会年会和在西班牙巴塞罗那举行的欧洲核医学协会年会；在加拿大埃德蒙顿举行的两年一次的放射性药物科学国际专题讨论会。



图 I-1. PET 示踪剂生产用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)。

124. 放射性核素治疗方案如利用镱-177 或钷-90 标记肽治疗神经内分泌肿瘤方面的进步推动了以下方面的开发工作：需要处理相对较大数量放射性同位素的治疗用放射性药物小规模现场制备工作使用的自动合成器和屏蔽装置；及其剂量学研究用 PET 的对应物。同样，对利用发射 α 的放射性同位素治疗癌症的兴趣也导致了短寿命 α 发射体如铋-213 生产方法的进一步改进。

I.1.2. 钼-99 的供应保证³⁰

125. 裂变产生的钼-99 和钨-99m 发生器供应的严重短缺一直继续影响着全球大多数地方对患者的医疗诊断应用。荷兰佩滕高通量堆已自 2010 年 2 月起关闭，以便进行必要的维护和升级，预计将于 2010 年 8 月重启。此外，由于发生泄漏，加拿大国家多用途研究堆于 2009 年 5 月停堆大修，预计至少要到 2010 年 7 月末才能恢复运行。

126. 为了部分弥补所出现的短缺，比利时莫尔 BR2 反应堆和南非 Safari-1 号研究堆则尽可能增加了生产。荷兰佩滕的 Covidien 同位素生产设施正在利用波兰的 MARIA 反应堆辐照现有的钼-99 生产用高浓铀靶件，以增加钼-99 的供应。比利时弗勒吕斯放射性元素研究所的生产设施也同样在利用捷克共和国雷兹的反应堆辐照高浓铀靶件。澳大利亚核科学和技术组织完成了其利用澳大利亚开式水池轻水堆低浓铀靶辐照的新生产设施的热调试，并取得了开始经常性规模生产的监管批准，这种规模生产将使该设施的产量达到全球出口数量的 10%。埃及（基于阿根廷技术）在临近 ETRR-2 反应堆

³⁰ 可在最新年度报告相关部分 (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>) 或在 <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/Agenda/index.html> 网址上获得更多资料。

建造的另一处基于低浓铀的生产设施已接近完成监管机构要求的技术评审，并定于2010年年中之前获得开始进行热调试的许可。

127. 各种利益相关者包括专业医学机构发出了开展国际合作和提供政府支持的呼吁。应加拿大政府的请求，经合组织核能机构成立了医用放射性同位素供应保证高级别工作组³¹，以解决加强钼-99 供应可靠性的各种相关问题。³² 此外，图像生产商和设备供应商协会也加强了其协调和传播与反应堆运行时间表和停堆期间有关的资料的作用。在这方面，原子能机构为促进研究堆的联盟所提供的支持导致发起了一项涉及位于中亚和欧洲的四座反应堆和匈牙利的一个处理设施的企业家的主动行动。加拿大政府设立了一个由四名成员组成的专家小组，以便就保证医用放射性同位素供应的措施提出建议，该小组的报告已于2009年12月发表³³。

I.2. 辐射技术应用

I.2.1. 无菌包装材料和容器电子束消毒

128. 50 多年来， γ 辐射一直被用作对可处理的保健产品、部件和包装进行消毒的一种安全且成本高效的方法。电子束辐射消毒大约在可利用功效和可靠性得到改进的电子加速器的30年前即得到认可。当前，该方法是处理数量大/低价值产品（如注射器）以及数量少/高价值产品（如心胸装置）的精选方法。

129. 最近，在美国开发的一种新电子束方法面世，为无菌包装材料和容器进行消毒或清洁提供了一种无化学品的替代方法。果汁、牛奶饮品和其他饮料的无菌包装是食品加工工业增长最快的部门之一，因此，人们对能最大程度减少能源和水的消耗同时又能提供所需性能特点的替代性包装消毒技术的兴趣大增。全世界目前已安装或在建的这类电子束装置有27个。该领域的最新发展是利用旨在对饮料瓶内部进行消毒的低能电子束发射器（见图 I-2）。这种电子束发射器可以各种方式进行结合和布置，并安装在能对瓶、帽、包和袋进行消毒的生产线上。取决于结构状况，对无论内部还是外部还是两面的辐照都可以在几秒钟内完成。这样就取消了高温处理和对化学品的使用以及化学处理后的清洗，从而节省了能源和水，降低了成本并简化了物流过程。

³¹ <http://www.nea.fr/html/ndd/med-radio/>。

³² 原子能机构作为观察员派代表参加了医用放射性同位素供应保证高级别工作组。

³³ 见 <http://nrcan.gc.ca/eneene/sources/uranuc/pdf/panrep-rapexp-eng.pdf>。



图 I-2. 电子束发生器对用来盛装饮料的瓶里进行消毒 (<http://www.aeb.com/>)。

I.2.2. 碳基纳米结构的辐射合成

130. 碳基纳米结构如碳纳米管开创了纳米技术应用领域令人激动的各种可能性，特别是从硅基微电子向纳米级的转变。基于电子束的方法惟一适合完成以下任务：如碳纳米管焊接；通过电子束平板印刷制作含碳纳米管结构的图案；对约束在纳米管中的金属丝进行合成；离子沟道效应在给药系统和电子工业中的潜在应用。去年，来自日本和中国的一组研究人员报告，通过将 120 千电子伏电子束聚焦在石墨纳米片上，石墨纳米片可以转化为石墨烯，并进而转化为石墨烯纳米带。继续辐照最终得到可成为一根完整分子线的单股碳丝线。通过这种方法，电子束技术帮助制造了很有潜力作为医用和电子用分子装置最终基础部件的大多数碳基纳米结构。

131. 为了促进研究团体之间的交流、向工业界转让科学解决方案以及向最终用户提交产品³⁴，成立了 EUMINAfab 这个欧洲微加工和纳米加工领域的企业、大学和国家实验室联合体。该联合体集技术、装置和专门知识于一体，配备有微细图案和纳米图案成形技术、薄膜沉积、复制和表征领域必要的技术支持人员，并可提供对 36 个装置的免费使用。

³⁴ 在罗马尼亚举行的原子能机构关于“纳米科学趋势：理论、实验、技术”的讲习班也包括了类似的范围，其特点是强调了辐射技术在纳米技术中的作用。该讲习班由阿布杜斯·萨拉姆国际理论物理中心（国际理论物理中心）、原子能机构和霍里亚·胡卢贝国家物理和核工程研究所联合组织。