

## 从医学角度看核动力

### 美国医学协会科学事务委员会报告的摘要

在美国，用核动力发电是安全的吗？核动力堆的爆炸，会象 1986 年切尔诺贝利爆炸那样造成放射性的广泛扩散吗？动力堆是怎样工作的，保障它们安全运行的原理是什么？医生在核动力方面应起什么作用？美国医学协会 (AMA) 科学事务委员会最近的一份报告讨论了这些问题。由一个专家委员会编写的这份报告，受到了美国医学协会代表会议的赞同。本摘要概述了该报告的要点和全部结论。

美国的卡塔贝核电厂



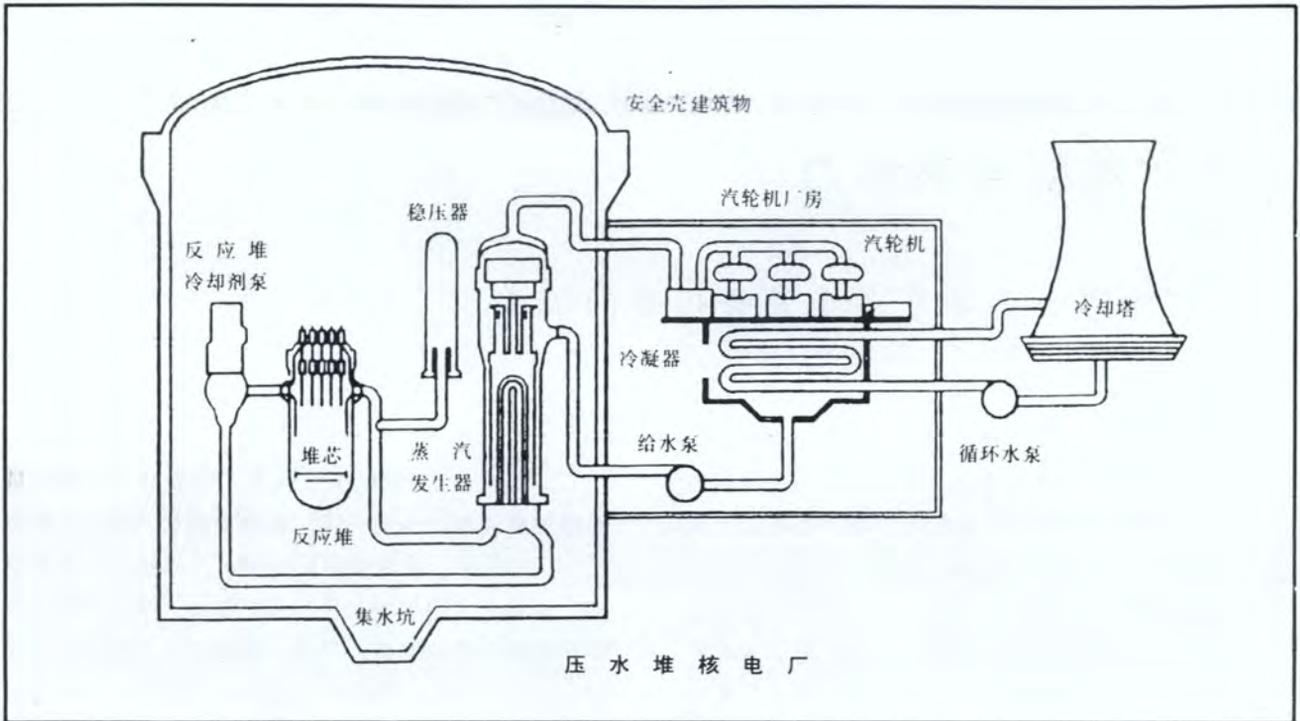
美国自 19 世纪中叶以来，随着能源可获得量的增加和能源价格的下降，能源消耗量一直在稳步增长。<sup>1</sup> 在美国，能源使用量的增长，导致了工业的发展、运输速度的加快、生产率的提高、生活质量的改善和健康水平的提高。目前，电能已占全国能源消耗量的 1/3 左右。1960 年，美国只有 0.1% 的电力是由当时正在运行的 3 座反应堆发出的；1987 年，约有 18% 的电力是由 106 座反应堆发出的。<sup>2</sup>

但在本世纪 80 年代，核动力的吸引力减弱。1979 年三里岛核电厂发生的部分堆芯熔化事故（和 1986 年切尔诺贝利核电厂发生的蒸汽-氢气爆炸）使人们增加了对于安全性的关切，使得建造和运行费用逐步上升。许可证审批和运行方面出现的长时间拖延，其中许多是由于联邦法规的变动所造成的。一些核电厂的定单被撤消，另一些电厂则停止建造。1977 年以来，尽管一直没有人提出建造核电厂的新申请，但在几个州中开展的禁止核动力的公民投票也一直都没有成功。

#### 核电厂

核电厂利用核裂变释放的能量发电。在核反应堆中，铀-235 原子核之类的重原子核发生分裂，生成较轻的原子核，同时释放大量能量。一座反应堆的堆芯含有数千根细长的薄壁锆合金管，管内装填着许多多个核燃料芯块。每个芯块的直径约为  $1\frac{1}{3}$  cm，

\* 该报告出自设在美国芝加哥的美国医学协会科学事务委员会，发表在：the Journal of the American Medical Association (JAMA), 17 November 1989, Vol. 262, No. 19, Copyright 1989, American Medical Association, 535 Dearborn St., Chicago, Illinois 60610, USA.



高度约为  $2\frac{1}{2}$  cm。燃料中的裂变反应是由被俘获的低能中子引发的。在裂变过程中，每个原子核释放 2 或 3 个“快”中子，它们如果得到慢化，便能有助于发生自持链式反应。中子的慢化是由“慢化剂”，即水或石墨之类的低原子序数物质完成的。

美国的大多数动力堆被称为“轻水堆”(LWR)，因为它们使用普通水使中子的速度降低并使核燃料冷却。轻水堆有两种类型，即压水堆(PWR)和沸水堆(BWR)。在这两种类型中，反应堆堆芯都被装在气密的钢制压力容器中，后者的壁厚为 15—25 cm，直径 360—450 cm，高 12 m 或更高些，其目的是使放射性不会被非故意地释放出来。

在典型的压水堆中，堆芯中被加热了的水被泵送到蒸汽发生器，一部分热量在那里被传递给温度和压力较低的水，使其沸腾并产生能够驱动汽轮发电机组的蒸汽(见附图)。汽轮机排出的低压蒸汽经冷凝后由给水泵送回蒸汽发生器。通过冷凝器冷却环路后流到冷却塔或附近水体的水不带放射性。在沸水堆中，堆芯中产生的蒸汽在通过位于压力容器顶部的汽水分离器后，直接流向汽轮机。

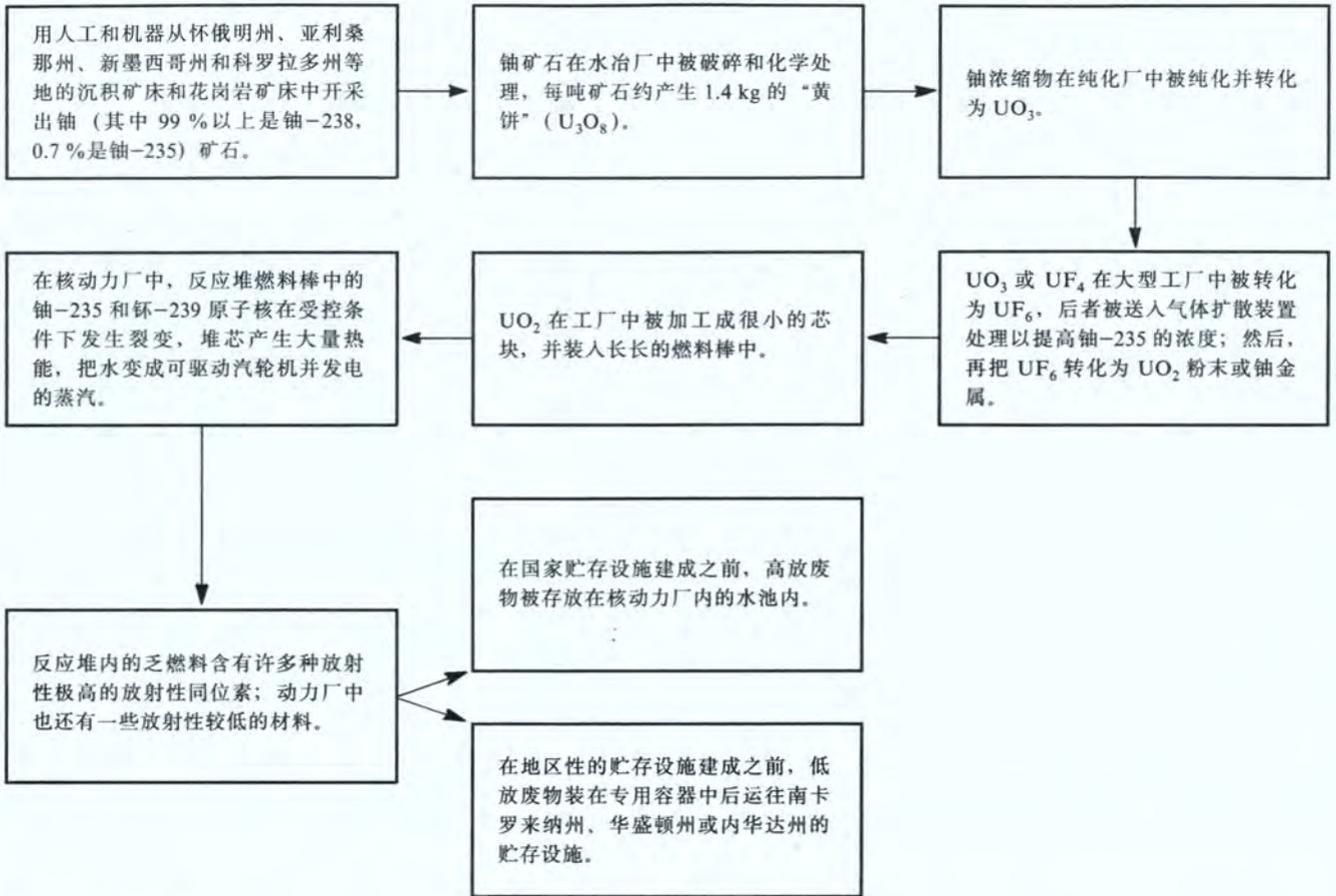
核裂变的产物是有放射性的，因而随着反应堆的运行，反应堆燃料的放射性越来越强，发热量也越来越大。在一座典型的反应堆中，放射性总量约为  $111 \times 10^{19}$  贝可(Bq)，其中大部分滞留于燃料芯块

中，这些芯块如得不到冷却便会熔化。轻水堆的主要安全课题之一，是要拥有能在各种假想的系统失效工况下仍能可靠地导出这些放射性热的手段。

西方国家建造的所有轻水堆的一个重要安全特点是，它们都被设计成具有负的空泡系数。这意味着，当堆芯温度增高时，水变成蒸汽使堆芯中“空泡”所占的空间增大，从而导致功率下降。切尔诺贝利核电厂的反应堆具有正的空泡系数，这就是说，当堆芯中的水变成蒸汽时，它的功率会上升。这种不利的特性，加上严重地违反操作规程和缺乏有效的安全壳结构，导致了切尔诺贝利核电厂 4 号堆的蒸汽-氢气爆炸和放射性的广泛扩散。<sup>3,4</sup> 切尔诺贝利式事故在具有负的空泡系数的反应堆中肯定不会发生，而空泡系数为负值则是所有美国核动力堆的特性。因此，切尔诺贝利式事故在美国核电厂中是不可能发生的。

### 核燃料循环

核动力的生产涉及到一连串设施，分别用于铀的开采和提炼，燃料的制造，使用燃料发电，乏燃料的处置，以及放射性物质的运输与管理(见下页附图)。<sup>5</sup> 当含有铀-235 的堆芯接近其使用寿命时，大约一半的铀-235 已经消耗掉，同时有少量的铀-238 被转变为钚-239 和其它超铀元素。目前，动力堆卸



美国核燃料的来源、加工和处置。(来源:《全国地理杂志》(1979年)<sup>5</sup>)

出的乏燃料，在高放废物贮存设施的建造得到批准并建成以前，一般贮存在反应堆现场。

在美国，除乏燃料以外，每年装运的放射性物料约有 280 万件，包含的活度约为  $33.3 \times 10^{16}$  Bq。<sup>5</sup> 货运管理任务主要由美国运输部负责，管理法规的内容与所涉及的放射性核素和运输工具的类型和数量有关。装运的大多数物料都是基本上无害的物料，把它们装在纤维板箱、木箱或钢桶（称作“A型”货包）中就可以安全地运输。中等放射性的物料要装在“B型”容器中运输，这些容器必须满足更严格的标准。高放废物、乏燃料和超铀废物的装运涉及大量的放射性，需要更多的防护措施。装运这些废物用的重型金属容器，要经过严格的检验，才能得到联邦政府负责机构的认可。<sup>5</sup>

在放射性废物管理方面，派生出的社会政治问题比技术问题还复杂。主要问题是各地的人都想把放射性废物送到别处去。放射性废物是按其物理性质、化学性质和来源分类的。根据法律，由国防计划产生的

废物，必须与民用活动产生的废物分开来管理。废物的半衰期和化学形式对废物管理工作也有影响。

低放废物包括实验室研究工作产生的被污染的纸和生物材料之类的废弃物，以及来自核电厂的被污染的布、塑料制品、金属屑和建筑材料之类的弱放射性废物。在为数不多的场地上，已经积累了数量很大的另外两种低放废物，一种是从铀水冶厂排出的尾矿，另一种是从铀、镭与钍处理工厂的提纯操作中产生的废物。

公众所受到的来自低放废物处置操作的辐射照射量与来自天然源和医用源的辐射照射量相比，一直比较小。不过，过去在低放废物处置方面也发生过一些问题。在 1980 年和 1985 年，美国国会曾通过立法，要求各州在 1993 年 1 月 1 日以前，将其境内产生的低放废物处置掉；并鼓励州与州之间订立“地区性协定”，以选择共同的处置场地。最近发表的一份美国医学协会报告（报告 A，1988 年中期会议）评述了低放废物处置问题。

高放废物主要有两种——未经后处理的反应堆乏燃料和乏燃料后处理中产生的液态与固态剩余物。此外还有少量的超铀废物，大部分来自武器生产。在过去 40 年中，研究出了几种封隔高放废物的方法，其中包括现场固化、地质封隔、海底沉放和海底下埋藏，以及以泥浆形式注入深地层岩缝中。<sup>6,7</sup> 看来将高放废物经处理后置于开挖出的洞穴中然后设置多重屏障实现地质封隔的做法，是最有前途的处置方案。1988 年通过的联邦法规要求对内华达州的尤卡山进行勘探，研究将此处作为全国性高放废物处置库的可能性。

放射性废物处置风险的评价工作有几个重要的特点。最重要的是要求进行风险评价的时期实在太长，这在历史上是没有先例的。此外，关于可以合乎道德地加于子孙后代的辐射剂量限值的概念，一直在缓慢地变化，这种变化妨碍着高放废物处置设施准则的制定。妥善设计的设施可以很容易满足美国核管理委员会（NRC）给轻水堆规定的剂量限值，即 0.10—0.25 毫希/人·年（mSv/人·a）的要求。

一些研究者已经使用天然样本来推断放射性废物在深地质处置库中的行为。<sup>5</sup> 对包括西非奥克洛铀矿和巴西米纳斯热赖斯大型钍与稀土矿床在内的天然样品的研究表明，一些天然矿床在整个地质时期内也许一直处于稳定状态。

## 核电厂的正常运行

1987 年年中，美国运行中的核动力堆有 106 座，其中包括 68 座压水堆、37 座沸水堆和 1 座高温气冷堆。在较老的核电厂和使用沸水堆的核电厂，电厂工作人员与一般公众受到的辐射照射量要比一般情况稍微高一些。工作人员所受的辐射照射量，主要来自从阀门和管道金属表面以及从堆芯内部构件上腐蚀下来的碎屑。在反应堆运行过程中变成放射性物质的那些物质，来自制造部件的钢材中通常以合金元素形式存在的那些杂质。在燃料元件制造过程中留在燃料元件表面的少量铀，以及因为燃料棒包壳带有轻微的缺陷而在正常运行中逸出的铀和裂变产物，对于工作人员所受的辐射照射量的贡献都比较小。

工作人员主要是在停堆后的反应堆大检修和换料作业期间受到辐射照射的。最大的辐射剂量发生在大检修期间，此时进行的作业包括：各种阀门的拆卸和重新组装；一回路水系统检修孔的移位和复位；压水

堆蒸汽发生器换热管的测试、去污、清洗和堵塞；沸水堆的检查和校正性检修；以及为了能进行换料而将反应堆容器和内部设备顶端部件移位和复位。在设备去污和放射性废物处置过程中，工作人员也会受到照射。核动力工业界职工的集体放射性剂量，是核动力工业对健康的总体影响的最恰当估计值。1986 年，对于每套压水堆机组和每套沸水堆机组来说，全体工作人员所受的平均集体剂量分别为 4.8 人·希（人·Sv）和 6.5 人·Sv。人均剂量为 4 mSv/人，而且受照最多的工作人员所受剂量都低于 NRC 规定的限值。工作人员所受的照射量，由电力公司、承包商、美国核电运行研究所（INPO）和 NRC 负责监测和监督，这有助于确保这些照射量不超过联邦政府规定的照射量标准。

1974 年，NRC 曾要求，运行中动力堆必须设计或修改成使它们的排出物对周围居民造成的辐射剂量是“可合理达到的尽可能低的”。NRC 曾规定，对于处在厂区边界处或边界外的任何个人，由气载气态释放物造成的全身剂量的上限值为 0.05 mSv/a，由释放的放射性碘造成的甲状腺剂量的上限值为 0.15 mSv/a，和由液态排出物造成的剂量的上限值为 0.03 mSv/a。这些限值都只是天然本底辐射对个人造成的平均剂量 3 mSv/a 的很小部分。<sup>8</sup>

在三里岛事故以后，NRC 和核动力工业界都对辐射防护工作给予了更大的注意。核动力工业界在这方面开展的许多活动是以 INPO 为中心的。现在，INPO 和营运核电厂的电力公司对于旨在把照射量保持在可合理达到的尽可能低的水平的各种辐射防护和培训计划都很支持。几乎所有的动力堆运行时都很注意这一点，结果是由排出物造成的辐射剂量都远低于上述的规定限值。全身剂量一般低于 0.001 mSv/a，来自所有途径的甲状腺剂量一般低于 0.01 mSv/a。NRC 最近一次公布的数据是 1983 年的数据，那时正在运行的 80 座动力堆的排出物所造成的总剂量是：来自气载途径的 0.95 人·Sv，来自液体途径的 0.76 人·Sv。对于住在距动力堆 80 km 以内的人来说，平均剂量为  $4 \times 10^{-5}$  mSv。

## 非计划的放射性物质释放

美国设计的核动力堆是不可能象核武器那样爆炸的。另外，反应堆中易裂变的铀-235 被大量的铀-238 所稀释，而且功率水平的可能上升速率，已

被限制到远低于武器型能量释放所要求的数值。不过，动力堆的堆芯中含有许多放射性物质，如果这些放射性物质中的相当大一部分被释放出来，就可能对人民的健康和财产以及对环境造成很大的损害。

只有导致堆内燃料熔化的那种工况或事件，才能给公众健康带来严重的后果。在美国使用的动力堆类型中，人们最担心出现的情况是链式反应虽已中断但堆芯余热导出系统失灵。在这种情况下，堆芯温度将急剧上升，直至达到核燃料的熔点。三里岛发生的事故就属于这种情况，一个阀门被卡在开启位置上，造成冷却水的流失，而操纵员却错误地关掉了应急冷却水系统。结果是堆芯部分熔化。

在反应堆燃料能熔化的那种高温下，某些放射性裂变产物挥发，并以细颗粒或气溶胶的形式从熔化了燃料中释放出来。相当一部分气溶胶将粘附于堆内温度较低的金属表面，这个过程称为“镀层分离”。另外，包括喷淋系统或大型水池在内的裂变产物去除系统理应开始工作。反应堆中的某些裂变产物是氙和氪等惰性气体的放射性同位素。这些气体由于化学上是惰性的，它们被释放入大气是无关紧要的。

堆芯熔化给人的健康带来的后果，取决于化学上活泼的裂变产物冲出反应堆安全壳的概率。NRC 1975年的一份报告，曾分析过轻水堆的各种运行情况，并得出结论说，堆芯熔化的概率约为  $5 \times 10^{-5}$  / 堆年。<sup>9</sup> 这一估计值的不确定度是 10，因此，堆芯熔化的概率实际上处在  $5 \times 10^{-4}$  / 堆年与  $5 \times 10^{-6}$  / 堆年之间。这份报告还得出结论说，在堆芯熔化事故中，能释放出对生命有威胁数量放射性的熔化事故不到 1%。从 NRC 的这些估计值中可以得出这样的结论，即如果美国的 100 套核电机组运行 10 年，则在这 10 年中发生能导致释放对生命有威胁数量的放射性堆芯熔化概率，将为  $100 \times 10 \times 5 \times 10^{-5} \times 0.01$ ，或者说  $5 \times 10^{-4}$ 。不过，这种计算方法没有考虑在核电厂的设计和运行方面已积累起来的安全方面的改进。

有关核电厂放射性释放特性的知识，对制定发生这种释放时如何保护公众的计划是有用的。此时如果人们呆在门窗紧闭的建筑物内，则由释放出的放射性造成的初始照射量较小，因为建筑物对于外界的辐射能起到某种屏蔽作用，并能减少接触气载放射性的机会。如果呆在没有地下室的木结构建筑物内，可以收到中等程度的剂量减小效果；若呆在大型的商品化建筑物内，会收到更好的效果。

如果发生一起大型的放射性释放事故，对于处在

距出事动力厂几公里以外的大多数人来说，最好的对策是呆在家中或建筑物内，直到初期释放的放射性，即“放射性云”飘离当地为止。然后，被放射性严重污染地区的居民应撤走。即使在可以预见的最坏情况下，居民疏散工作也可以在放射性云飘过以后数小时内进行。让居民在自己家中等待数小时，可以达到三个目的：第一，能够减少必须立即疏散的人数；第二，能使人们在放射性云尚在本地区时获得一定的保护；第三，有助于减少恐慌。在放射性云飘离以后，主管部门就可以断定哪些地区已经受到污染，并提出下一步的行动方案。

切尔诺贝利核电厂的爆炸，曾将几十亿 MBq 的放射性物质释放到环境中。可是，事故发生后将近 48 小时，才开始疏散居民。那些曾呆在室内的人，受到的平均辐射照射量约为 0.03 Gy，而未曾隐蔽的人所受到的剂量为 0.1—0.15 Gy。<sup>10</sup> 这起爆炸发生后的医疗响应是分三级进行的：在厂区进行营救和急救；在地区医院进行紧急处理；以及在莫斯科的一个专业医疗中心进行评价和治疗。

如果受到放射性碘的辐照，也许可以使用碘化钾之类的阻滞剂来阻止放射性碘的摄取。应该根据美国国家辐射防护和测量委员会的建议<sup>11</sup> 适时地服用阻滞剂。在切尔诺贝利发生爆炸后，苏联的医疗主管部门曾向该地区的所有儿童保育单位分发了碘剂；这些碘剂的服用曾被认为是高度有效的。<sup>12</sup>

一起严重的放射性释放，所造成的辐射照射量的变化范围可以很宽。最高的可以达到 2 Sv 以上，这样大的剂量会使许多人患辐射病，并使少数人丧生。只有在民用和公共的卫生防护设施完全遭到破坏的情况下，才可以预期会有不止一两个人（不包括电厂工作人员）受到生命威胁。切尔诺贝利的经验似乎证明了这样一点：即一般公众中没有人受到能引起辐射病的剂量。不过，有 100 人曾受到了大于 1 Sv 的剂量，同时有 31 名电厂工作人员和消防人员死于烧伤和辐射伤害。<sup>3, 10</sup>

一起放射性释放事故可能会使不少人受到 0.1—1 Sv 的剂量。尽管预料这些人不会发生由辐射诱发的疾病，但他们很可能产生心理上的紧张和不安。更多的人也许会受到低于 0.1 Sv 的剂量，他们需要的只是去污而不是治疗。在切尔诺贝利爆炸事故中，至少有 10 万人属于这一类。<sup>10</sup> 正如三里岛事故所表明的，那些生活在放射性释放地区的人，虽未受到可测得出的剂量，但可以出现由焦急不安诱发的种种症状。

如上所述, 美国的轻水堆不易发生切尔诺贝利式事故。当然, 堆芯熔化事故加上想像的安全壳同时失效, 也会释放出其量与切尔诺贝利事故释放的量相近的放射性。但是, 情景分析表明, 结局类似于三里岛事故的可能性要大得多。在那起事故中, 反应堆安全壳起了良好的作用, 释放的放射性估计约为  $37 \times 10^{16}$  Bq 的放射性惰性气体和不到  $111 \times 10^{10}$  Bq 的放射性碘。核电厂厂区外的人受到的剂量没有一个大于 1 mSv。

辐射照射的长期效应可以包括癌症、甲状腺疾病、白内障, 以及可能发生的一些遗传异常。这些效应在受照群体中的出现频度, 通常是根据一条保守的假设, 即剂量与效应之间存在着线性关系, 按照群体所受的集体剂量估算的。

一起堆芯熔化事故造成的全身集体剂量, 估计其变化范围为安全壳有效时的 10 人·Sv 到各种系统均按可能的最坏方式失效时的  $10^6$  人·Sv。一条“经验法则”是,  $10\,000$  人·Sv 的集体剂量可能引起 200—400 例的致命癌症; 但不能排除只发生很少甚至不发生死亡的可能性。<sup>13</sup> 因此,  $10^6$  人·Sv 的集体剂量, 将在随后的几十年中引起多达 4 万例的致命癌症。这么多例致命癌症很可能发生在所论核电厂周围, 也许多达 1000 万人的群体中。在这样一个群体中, “自然”发生的致命癌症将近 190 万例。辐射效应仅使这个数字增加不到 2%, 因此这种效应是难以察觉的。

上述这种可预见的最坏的放射性释放, 可能性更大的一个后果是以与自发发病率相近的值发生附加的甲状腺小结。遗传效应的发生率很可能比自然发生率的 0.1% 还低, 因而将是观察不到的。<sup>14</sup>

### 与核动力相关有风险

任何方式的能源生产都有一定的风险; 例如, 1988 年 7 月北海石油平台的爆炸死亡 166 人。井下采煤是最危险的职业之一, 而在美国, 在向发电厂运送煤炭的过程中, 每年约有 100 人死于在道路平面交叉处发生的事故。煤燃烧排出的有害物质会引起空气污染和疾病, 产生的灰和残渣则必须加以处置。所有这些活动也都包含着风险。

美国环境保护局、NRC 和联邦的其他管理机构, 已试图对各种能源生产技术的燃料循环进行管制, 以消除不合理的风险。例如, 为大型燃煤锅炉制订的新的性能标准对硫的氧化物和颗粒物质的排

放量作了限制; 对井下采掘作业已进行了管制, 以减少工伤事故和采煤工人肺尘病的发生率; 核燃料循环给公众带来的辐射照射量则一直是受到管制的。因此, 现在的燃煤电厂和核电厂有可能比 20 年前更安全。

70 年代初期, Sagan 和 Lave、Freeberg 等人曾比较过各种能源生产工艺技术给公众带来的健康风险, 并且得出结论说, 与燃煤电厂相比, 核电厂给公众健康带来的风险要小得多。美国纽约州阿普顿的布鲁克海文国家实验室的 Hamilton, 曾在 1974 年重新研究了这个问题, 并且作出结论说, 现代的燃煤电厂仍然没有核动力厂那样安全。<sup>15, 16, 17</sup>

就煤而言, 地下开采和空气污染是对发病率与死亡率的估计结果起决定作用的两个方面, 其次是运输带来的危险。如果煤是地下开采的并且是由铁路运输的, 则估计从开采到燃烧的燃料循环中, 每吉瓦年的发电量有 279 例疾病和伤害, 以及 18.1 例死亡。<sup>17</sup> 可是, 据估计, 用地下开采方法采铀的核燃料循环, 每吉瓦年只有 17.3 例疾病和伤害, 以及 1 例死亡。

发病率和死亡率的估计结果都有几分不确定性, 这是因为在燃煤电厂排放的颗粒物质和二氧化硫引起的健康效应方面, 以及核动力厂事故给公众造成的风险方面, 都难于取得一致意见。Morris 等人认为, 以石油或天然气为燃料的采用现代工艺技术的锅炉, 比使用煤或核能的锅炉安全一些; 而太阳能技术的安全性要差一些, 因为某些太阳能电池使用有毒材料, 而且为采集能量必须建造庞大的构筑物, 维护这些构筑物则会带来一些伤害。<sup>18</sup>

### 核动力·医生·社会

美国需要足够的电力供应, 以保证企业能运转、住房和学校得到照明、建筑物得到空调、食品得到保藏, 并保证提供满意的医疗服务和满足其他用途的需要。象煤、天然气、水、风和阳光一样, 核动力是可用于发电的一种方案。但核能又涉及到产生电离辐射, 这种电离辐射可能对人类产生不利的影 响。因此医生应该了解这种发电方式的原理。

经验表明, 一旦核动力厂发生紧急情况, 便会有患者及其家人、记者、同事和其他许多人, 向医生提出询问。医生应该懂得如何发现已释放了多少放射性, 并有能力向患者及公众提出适当的忠告。他们应



日本的女川核电站

该知道辐射损伤的征兆、症状和各种诊断方法，并知道特种血液检验的重要性。（各办公室、诊疗所和急诊室应备有本文所列出的参考文献 19 和 20。）疑难的病例也许需要请专家会诊。在美国，设在田纳西州橡树岭的辐射紧急援助中心 / 培训基地昼夜提供服务，其电话号码为 615 / 482-2441。

在公众眼里，医生是博学的，而且能够在涉及健康风险的决定和活动方面，提出有远见卓识的建议。警察和消防部门、辐射防护和应急管理机构、医院和工业界等社会团体，也许会要求他们，帮助制订涉及辐射、化学品泄漏、火警和自然灾害等紧急情况的应急计划。一旦发生严重事故，则州长办公室和州的一些机构将会参与处理，一些联邦机构则会提供援助，例如联邦紧急事件管理署、美国公共卫生署、全国灾害医疗系统和 NRC 等。这些机构大多在麻萨诸塞州的波什顿、纽约州的纽约、宾夕法尼亚州的费城、佐治亚州的亚特兰大、伊利诺斯州的芝加哥、得克萨斯州的达拉斯、堪萨斯州的堪萨斯城、科罗拉多州的丹

佛、加利福尼亚州的圣佛朗西斯科和华盛顿州的西雅图设有地区办事处。

在解决科学在社会中的作用方面，也需要得到医生的帮助。所有的人，包括医生在内都会因科技的兴旺而得益，也会因其颓萎而受损。为了最佳地履行自己的职责，社会各成员应该对科学原理和科学概念有一个比较好的了解，这将有助于他们就核动力、饮用水中的化学品、有害废物、杀虫剂和食品添加剂等重要问题作出决定。

许多有头脑的人认为，美国现行的教育制度限制了年轻人对于科学的了解。因为美国医生在社会界中有较大的影响力，他们是能够通过努力改善对于每个人的科技及其应用的教育来改变这种限制的。

#### 结论性意见和看法

美国医学协会科学事务委员会提出如下结论性意见和看法：

- **电力需求**——为了人民的健康和社会的进步，需要有足够的发电能力。
- **节能**——应该继续重视节能和能源的高效利用，并加速进行这方面的工作。
- **发电的安全性**——在最近几十年中，美国的发电已变得愈来愈安全，环境影响愈来愈小。
- **核动力的安全性**——在美国，核动力发电的安全性，是可以接受的。
- **反应堆的安全性**——美国设计和建造的动力堆，是能安全运行的，可阻止非故意的辐射和放射性的释放；反应堆的安全设施已被证明是有效的。
- **工作人员的受照量**——工作人员的电离辐射受

照量在最近 10 年中一直减少，现在已经很低。

- **放射性废物的处置**——各州均应继续努力，以便达到国会确定的 1993 年 1 月 1 日前将低放废物处置掉这一目标。
- **医生的作用**——医生应该掌握如何处理受到电离辐射损伤的人员方面的知识。他们完全有责任在发生辐射紧急事件后对公众提出忠告，并对有关人员的焦急不安情绪作出响应。此外，他们还应该帮助改善公众对于核动力的好处和风险的了解。
- **美国医学协会的作用**——美国医学协会应该继续对影响公众健康的各种活动进行监督，并且继续就与医疗有关的技术对医生评价。

## 参 考 文 献

1. *Energy in Transition: 1985 - 2010*, National Research Council, W. H. Freeman & Co., New York, NY (1979).
2. *Commercial Nuclear Power 1987—Prospect for the United States and the World*, US Department of Energy, Energy Information Administration, Washington, DC (1987).
3. "A Visit to Chernobyl", by R. Wilson, *Science*, 236 : 1636-1640 (1987).
4. "Nuclear Power after Chernobyl", *Science*, 236 : 673-679 (1987).
5. *Environmental Radioactivity From Natural, Industrial and Military Sources*, by M. Eisenbud, 3rd ed., Academic Press Inc., Orlando, FL (1987).
6. *Radiological Assessment: Predicting the Transport, Bioaccumulation, and Uptake by Man of Radionuclides Released to the Environment*, National Council on Radiation Protection and Measurements; Report No. 76, Bethesda, MD (1984).
7. *A Study of the Isolation System for Geological Disposal of Radioactive Waste*, Board on Radioactive Waste Management, National Academy of Sciences, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC (1983).
8. *Public Radiation Exposure from Nuclear Power Generation in the United States*, National Council on Radiation Protection and Measurements, Report No. 92, Bethesda, MD (1987).
9. *Reactor Safety Study, an Assessment of Accident Risk in US Commercial Nuclear Power Plants*, US Nuclear Regulatory Commission; Publication WASH 1400, Washington, DC (1975).
10. "Soviet medical response to the Chernobyl nuclear accident", by R. E. Linnemann, *JAMA*, 258 : 637-643 (1987).
11. *Protection of Thyroid Gland in the Event of Releases of Radioiodine*, National Council on Radiation Protection and Measurements, Report No. 55, Washington, DC (1977).
12. "Radiological consequences of the Chernobyl accident in the Soviet Union and the measures taken to mitigate their impact", by L. Ilyin and O. Pavlovskij, *IAEA Bulletin*, Vol. 29, No. 4 (1987).
13. *The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation*, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, Division of Medical Sciences, Assembly of Life Sciences, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC (1980).
14. "Chernobyl: a radiobiological perspective", by J. Goldman, *Science*, 238 : 622-625 (1987).
15. "Human cost of nuclear power", by L. A. Sagan, *Science*, 177 : 487-493 (1973).
16. "Health effects of electricity generation from coal, oil and Nuclear fuel", by L. B. Lave and L. C. Freeberg, *Nuclear Safety*, 14 : 409-428 (1973).
17. "Practical consequences of the assessment of different energy health risks", by L. D. Hamilton, *Environ Int.*, 10 : 383-394 (1984).
18. *Health and Environmental Effects of the National Energy Plan: A Critical Review of Some Selected Issues*, S. C. Morris, H. Fischer, C. Calef, et al., Brookhaven National Laboratory; Report 51300, Upton, NY (1980).
19. *Medical Basis for Radiation Accident Preparedness*, K. F. Huebner, S. A. Fry, Elsevier North-Holland, New York, NY (1980).
20. *What the General Practitioner (MD) Should Know About Medical Handling of Overexposed Individuals*, IAEA, Vienna (1986).