

核安全与核能社会

雷奕安

今年是切尔诺贝利核灾难 25 周年，又发生了日本九级地震引起的福岛核电站泄漏事件。这两次核灾难后果严重，经济上损失巨大，受灾人口众多，心理阴影长期存在。包括美国三哩岛核事故在内的几次大事故，长远地影响了人们对核能的态度，核能发展有很大的阻力。核能的发展和不在发展现在在全世界范围内都是一个重大的政治问题，争论激烈。那么核能的关键问题在哪里，究竟安全不安全，究竟应不应该发展？本文将简要介绍核能的原理，几次重大核事故及其教训，讨论核能的安全关键是什么，要不要、应该不应该发展核能，如果要发展核能，我们应该怎么做。

一、核电厂基本原理及优缺点

核能利用的主要形式是发电，核能几乎等同于核电。自然界或人工生产的一些重原子核碰到一个中子会裂变成几个轻原子核。裂变释放大量的能量，与煤炭燃烧释放的化学能相比，裂变元素释放的能量大约是同等质量煤炭的三百万倍。

裂变时要放出更多的中子，从而引起更多的裂变，这就是链式反应。核反应堆中，有些中子会被吸收，不参与裂变反应。为了让核反应堆持续稳定运行，在裂变产生的第二代中子中，需要正好有一个中子引发裂变，而多出来的中子要被吸收掉。多余的中子可以用控制棒吸收。但持续调节控制棒很难保证安全，现在的反应堆都设计为负功率因子，也就是当反应堆功率超过设计功率上升时，因为水中气泡增多、密度下降等因素会导致慢中子数下降，从而裂变功率下降，也就是说，即使不用控制棒，反应堆也不会超过设计功率运行。控制棒可以用来调降功率或者停堆。从这个角度来说，核反应堆是非常安全的。

核能的主要优点体现在它的能量密度很高，需要的燃料少，一个机组每年大概只需要几十吨核燃料。在正常工作的情况下，除了排出一些废热，对环境的影响微乎其微。废热也可以用来供热。与化石能源相比，不排出二氧化碳，不污染环境，没有海量燃料运输要求，燃料储量几乎无限。与风能、太阳能等新能源相比，它紧凑、可靠、可在任何时候

出力，能够保障能源安全，运行成本低。

核能的缺点包括：建设成本高、周期长；危险，一旦出问题，后果非常严重；系统太复杂；设计寿命到期，拆除费用高昂；能生产核武器原料，意味着谁都能做原子弹；乏燃料（用过的核燃料）、核废料问题还没有解决；等等。

核能虽然建设和拆除的成本高，但总的成本并不比化石能源高，如果化石能源要收碳税的话，核能的成本更低。

二、核能的危险

核能的主要反对声音来自它的危险性。那么它的危险性究竟体现在哪些方面，能不能解决呢？我们先来看一下核电站为什么危险：

第一，核电厂是一个非常复杂的系统。为了保证安全，核电厂设计了很多冗余，又很复杂的控制系统。系统越复杂，越容易出问题。系统复杂了，操作人员很难掌握所有系统。出现异常，不能保证所有的处置都是正确的。

第二，核电厂需要持续不断地强制散热。同燃煤电厂一样，核燃料裂变释放的能量用来把水烧开，产生水蒸气发电。这里大约只有三分之一的能量转换为电能，其余三分之二的能量作为废热释放到环境中。一台发电 100 万千瓦的核电机组，废热功率约 200 万千瓦，如果用海水冷却，为了不影响环境，假定进出水温差为 10 度，则每天需要 400 万吨海水，每秒近 50 吨。

重核裂变后产生的轻核基本都是不稳定的，要衰变。反应堆运行一段时间后，大概 6.5% 的功率是由衰变热提供。对于 100 万千瓦电的机组，热功率是 300 万千瓦，衰变热功率约 20 万千瓦。这意味着即使完全停堆，反应堆还有 20 万千瓦的热需要排除到环境中。这是很大的一个热功率，如果散热失效，核燃料将融毁，导致不可控的核泄漏。由于大部分裂变产物寿命很短，从几十秒到几十分钟不等，衰变热衰减很快。实际上，停堆 10 分钟后，衰变热功率就会从刚停堆的 6.5% 降到 2% 左右，1 小时后 1.5%，一天后 0.4%，一周后 0.2%，对于 100 万千瓦电功率机组，一周后的热功率为 6 万千瓦，仍然

需要强制散热。换句话说，核机组永远需要强制散热，否则就会有熔堆核泄漏的危险。

第三，熔堆后，燃料还在不断放出大量的热和放射线，完全没有办法接近处理，只能依靠以前的设计将燃料分散冷却。这种设计是不可能预先做实验验证的。失去冷却后，控制棒会比燃料棒先熔化，燃料还能产生一定程度的链式反应，从而加大放热。但是熔堆后因为中子慢化不充分，燃料中中子浓度低，不可能再临界或核爆。几十吨温度非常高，密度非常大的核燃料如果聚集在一起，完全无法处理，它会不断熔化、汽化它下面的任何东西，不可阻挡地往地下走，直到自然稀释到一定程度。大量放射性物质会进入大气和地下水。

第四，核反应堆装料量大，如果加上随堆堆放的乏燃料，一个堆可以有数百吨高放射物质，其中放射性裂变产物有数百千克。作为对比，一颗原子弹只产生一两千克放射性裂变产物。因此，一个失控的反应堆对环境的危害远远超过一颗原子弹。杀死一个人的辐射剂量，折合成能量只需要不到一千焦耳（几天之内），而一百千克放射性裂变产物中蕴含的放射能是这一剂量的近一万亿倍。当然，实际危害不可能那么大，更实际的计算可以看乏燃料的衰变热。乏燃料从反应堆取出一年后，每吨产生 10 千瓦衰变热，也就是每秒 10 千焦耳，过 10 年后衰减到 1 千瓦。也就是说，每吨乏燃料取出后一年到十年间，每秒释放的放射能可以杀死几个人。全世界每年产生数万吨乏燃料。

以上是核电站的可能危险，是最坏的情况。鉴于国内的宣传缺乏这方面的信息，希望这些信息能够让大家更充分地了解核灾难的危害。但我们也不能用最坏的情况来判定这些情形会一定发生。就像每次坐飞机最坏的情况都很可怕，但是我们不能说每次坐飞机都会出现最坏的情况一样。

三、最大的几次核事故

这里简要介绍历史上最大的几次核反应堆事故。

三哩岛核事故 三哩岛核事故是不凑巧的一系列事件引起的。1979 年 3 月 28 日凌晨，三哩岛二号电站第二回路的一个泵不知什么原因停了，给它备份的管道阀门又没有打开，从而导致第二回路循环停止。汽轮机没有蒸汽，停止发电，引起紧急停堆。这时应该有三个辅助泵自动启动，排出核心衰变热，但因控制它们的阀门正在例行维修，没有

打开。根据美国核安全局的规定，维修这些阀门的时候必须停堆。所以这是重大违规。这样，第一回路失去冷却，温度不断上升，压强增大，导致压力容器顶端的一个安全阀自动开启降压。压强降下来后，本来安全阀应该自动关闭，可是它卡住了，没有关上。更糟的是，控制室显示安全阀是关着的。这样，在长达两个多小时的时间内，第一回路的冷却水不断外泄，最后堆芯过热熔化，放射性元素泄漏。但这次泄漏到环境的辐射并不严重。从统计来说，总共引起不到 1 例癌症死亡病例。

切尔诺贝利核事故 1986 年 4 月 25 日，切尔诺贝利 4 号堆计划进行一次停堆实验。由于另一座电站出了问题，为了保证电力供应，实验被迫推迟到晚用电高峰以后。这样时间就不够了，为了尽快将堆芯功率降到实验要求功率，实验人员插入了过多的控制棒，结果功率降得太低了，几乎停堆。为了迅速将功率调回来，实验人员拔出了一些控制棒。刚停下来的核反应堆，因为氙毒效应^①几个小时内是无法重启的，所以即使拔出了控制棒，功率也上不去。再加上别的一些原因，实验人员（已当场死亡）不停拔出控制棒来维持功率，超过了反应堆允许的极限。氙毒是有限的，耗尽之后反应堆超临界直接爆炸。

切尔诺贝利损失惨重，释放辐射量是原子弹的几百倍，危机持续到现在也没有解决。长期危害严重，但具体到数字，各种立场不同的组织众说纷纭，有的数字大到离奇。三个月内直接死于核事故的是 31 人，这个数字没有什么争议。联合国原子辐射效应科学委员会（UNSCEAR）2008 年的一份报告说确认死于核辐射的人数是 64。总共增加了几千例甲状腺癌患者，其中几百例死亡，其他癌症及出生缺陷没有明显增加。

福岛一号电站事故 2011 年 3 月 11 日，日本东部海域发生 9 级强震，导致福岛一号电站正在运行的 1、2、3 号机组自动停堆，一小时后，地震引起的巨大海啸袭击了电站，几乎破坏了电站厂房外的所有设施，包括备用柴油发电机和外接电源。袭击电站的海啸有 14 米高，大大超过设防的 5.7 米标准。大家要注意，艺术作品中总把海啸描绘为一列高大的波浪，实际不是这样。14 米高的海啸意味着海平面很快上升了 14 米，也就是大约 5 层楼高，并维持几十分钟到几小时不等。汹涌而来的海水破坏

力相当于巨大的洪水，横扫一切。电站的备用发电机和外部电源，即使没有冲走，也被淹坏了。

前面我们已经提到，核反应堆需要持续不断地强制冷却，冷却需要动力。所有的动力都没有了，堆芯立即进入危险的无冷却状态，压力容器里的温度和压强不断升高，后面一系列爆炸事件都是可以预计的。到目前为止，世界上任何核电站都无法解决停堆后后备动力丧失的问题，一旦发生，只有等着熔堆。这也是第三代反应堆强调非能动冷却的原因。

下面我们来看一下事情的具体发生过程。

福岛一号电站六个堆都是由美国通用电气（GE）公司设计的，1到5号机组是 Mark I 型，6号机组是 Mark II 型。图 1 是 Mark I 型反应堆示意简图。首先要说明，该堆型的设计和施工都是比较出色的。几座反应堆设计为能抵御 8.2 级地震，这一标准是有记录以来日本附近发生的最强地震，可是这次地震是 9.0 级，能量高了 16 倍。但地震并没有造成破坏，反应堆根据设计自动停堆了。反应堆在丧失外部冷却的情况下，还能靠湿井（图 1）里储存的水冷却好几天，其实这就是所谓的非能动设计了，虽然能源由自身的衰变热提供。

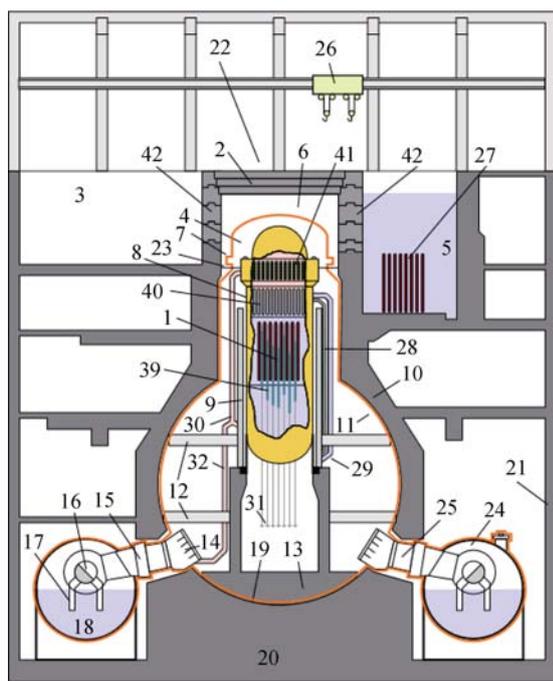


图 1 Mark I 型反应堆示意简图

关键部分：1 是堆芯，包括燃料棒和控制棒；8 是压力容器，即发电蒸汽循环的锅炉；19 是安全壳，用来在事故发生时封闭放射性物质；11 是干井；24 是湿井，约储存了 1000 多吨水，用来在外散热失效的情况下紧急散热；5 是乏燃料存放池。

停堆后，压力容器里面的水在衰变热加热下沸腾，变成蒸汽，蒸汽会推动一个应急涡轮发电，再驱动一个应急泵将湿井里面的水抽入压力容器，从而降低压力容器里面的温度，并将堆芯燃料维持在水面以下。湿井里面的水虽然有 1000 多吨，十倍于压力容器里面的水量，但毕竟是有限的。当湿井里面的水都变成蒸汽后，这一冷却过程就无法进行了。自然，压力容器里面的水继续烧开，水位不断下降，燃料棒就会露出水面。温度上升导致压力上升还会引起安全阀开启泄压，进一步减少压力容器里的水量。露出水面的燃料棒持续升温。2/3 的燃料棒露出水面，燃料棒的包层达到 900℃ 左右，开始破裂，裂变产物逸出燃料棒。3/4 燃料棒露出水面后，包层温度到 1200℃，包层材料锆金属和水反应，生成氢气和二氧化锆，这个反应是放热的，也就是说，该温度下，包层材料能够在水蒸汽里燃烧，放出氢气。放出的热进一步提高了压力容器里面的温度和压强。每个堆产生的氢气量达数百千克。氢气排放到干井中，随后安全壳的泄压再排到厂房内，本来设计氢气排放的时候会烧掉，但不成功。氢气在厂房积累到一定浓度，就会爆炸。一千克氢气爆炸蕴含的能量是一千克普通黄色炸药的 30 倍，因此数百千克氢气爆炸相当于一枚十来吨的巨型炸弹。

再来看堆芯，温度还在不停升高，到 1800℃ 左右，燃料包层就熔化了，钢结构也化掉了，再到 2500℃ 左右，燃料棒破裂，2700℃，核燃料熔化。三个机组有约 40% 的核燃料受损。

湿井的水烧开之后，安全壳内的温度和压强都上升。安全壳是一个几厘米厚的大钢壳加外围钢筋混凝土，是约束放射性物质不外泄的最后防线。三哩岛就是靠安全壳成功地阻止了放射性大规模泄露。安全壳设计能承受 4 个大气压。但 12 号早晨，1 号机组壳内压强达到了 8.2 大气压，有被胀爆的危险，因此采取了紧急泄压的办法，将安全壳内气体放出，这就放出了一些放射性物质。由于衰变热并没有停止，需要不停的泄压，里面的水就更少了。泄压的同时，还要往安全壳内灌水，以降低壳内温度。在核燃料没有过热，包层没有破坏的情况下，泄压放出的放射性是非常有限的。但地震后第二天早晨，1 号机组附近就发现了碘 131 和铯 137，意味着燃料棒已经破损。随着燃料棒破损或熔化的继续，释放出的放射性越来越多。

由于现场放射性太强，很多情况都不清楚。目前认为安全壳有一定损坏，现在里面都注满了水。情况可以说已经基本稳定了，以后衰变热会越来越来少，威胁也将越来越小。绝大多数放射性物质也封闭在安全壳内。但破损的安全壳会不停泄漏放射性。熔化的燃料棒有上百吨，泄压和泄漏释放出了大量的放射性元素。据估算，释放量至少超过切尔诺贝利 1/3，也就是 70 个原子弹的泄漏量。事件还没有结束，后续处理还需要投入巨大的人力物力，经济损失巨大，但是还没有人因为直接遭受辐射死亡。

除这三次事故外，1957 年分别在英国和苏联还发生过一次 5 级和一次 6 级核事故。

四、核事故的后果

如前所述，核电厂有巨大的潜在危害，一旦事故发生，需要疏散大量人员，损失大量财物和基础设施，废弃大片国土上百年。为此，虽然三哩岛核事故没有造成直接人员伤亡，长期影响也非常有限，但是人们意识到了核能的潜在危害性，从而改变了对核能的态度。三哩岛事故之后，美国再没有建过一座新反应堆，列入计划的纷纷取消。切尔诺贝利事故之后，全世界核能发展更是陷于停滞，25 年内增加的反应堆不到事故前 25 年建设的 1/10，参见图 2。反核成了一些政党的口号。这次福岛核事故再次引起了一些国家的反核浪潮。

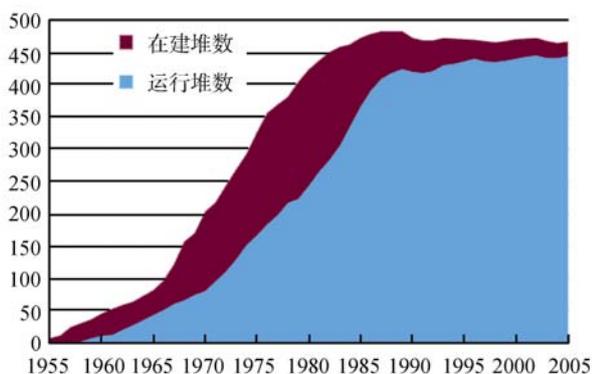


图 2 三哩岛和切尔诺贝利事故对世界核能发展的影响
图上可以看出，1979 年后，在建堆数目开始减少，意味着几乎没有新建堆。因为堆的建设周期很长，以及开工了的一般还是不会停下来。1986 年后，世界总运行堆数增加非常少，曲线从快速上升到几乎平下来。

近年来，由于化石能源消耗过多，碳排放、温室效应、全球气候变化成为很多人关心的问题，很多国家考虑重新启动核能建设。我国准备大规模建

设核电站。美国也出现了核能复兴的说法。可是这次福岛事故，直接影响了很多国家的核政策，废核、弃核成为了一个很严肃的话题。我国暂停了部分项目，并加快了核能立法过程。

三次大的核事故中，三哩岛和福岛都没有直接人员伤亡。即使在最糟糕的切尔诺贝利事故中，也只有几十人直接死亡。虽然增加了不少的甲状腺癌病例，但是甲状腺癌是可以治疗的。只要采取了合适的治疗手段，95% 的患者可以活 5 年以上，92% 的患者可以活 30 年以上，因此总增加的癌症死亡人数是数百人。从经济损失来看，根据科学家的估计，折合成现在的美元，三哩岛事件大约是 30 亿美元，切尔诺贝利约 2000 亿美元，福岛还很难估计，也可能到 1000 亿美元左右（不包括地震损失）。切尔诺贝利的甲状腺癌病例数目很大，跟初期处理不当有关，疏散也不够及时。

因此我们可以大致估计一次重大核事故的损失应该是几百例癌症死亡和 1000 亿美元左右的经济损失。

五、重大核事故的风险有多大

从 20 世纪 50 年代第一批核电厂建设到现在大约 50 年时间，共运行了大约 2 万堆·年，其间发生了 3 次重大核事故，两次为 7 级事故。两次 7 级事故起因一次是设计不当加人为错误，一次是重大天灾。所以，历史纪录是每 1 万堆·年发生一次危害较大的 7 级事故。

让我们以 100 年为尺度估计中国大规模发展核能的安全风险。

100 年内，中国大约需要 200 到 400 座百万千瓦电功率的反应堆。就以 $300 \times 100 = 3$ 万堆年作为估算依据。中国在建和将建的反应堆比目前正在运行的堆型要先进，制造商声称能达到百万到千万堆年一次事故的安全性。这不足信。但考虑到以前的安全纪录，堆型的改进，以及中国总的来说地质稳定，大规模海啸的可能性很低等原因，我觉得假定这一百年内出现一次 7 级事故是合理的。那么我们大致有了一个估计，100 年内将出现一次核事故导致千亿美元量级的经济损失，数百人因为癌症过早去世，数千平方千米国土百年内不能使用。

六、得与失——与化石能源比较

目前中国使用的初级能源 80% 来自煤炭，发展核能就是要取代煤炭。我们可以比较一下两种方式

各自的代价。

首先，两种方式的经济性目前差不多，如果要考虑对环境的破坏和碳税的实现的话，核能经济性优于煤炭。

其次，核能资源（铀和钍）折合成热值远远大于煤炭资源量，供人类几万到几十万年发展没有问题。

更关键的一点，3 万个百万千瓦年如果采用燃煤机组，需要 1200 亿吨煤。2010 年我国开采百万吨煤死亡率约 1.2 人，就算该数值还会不断下降，开采 1200 亿吨煤也意味着上十万煤炭工人的牺牲。比较而言，一次重大核事故造成的人员伤亡几乎可以忽略。2010 年中国电煤产量超过 16 亿吨，平均价格约每吨 600 元。1200 亿吨煤超过 10 万亿美元，考虑到以后能源供应必须增加，实际的数字还要高。在核电厂运营中，核燃料占的成本很低，与煤炭相比，在能源上节省的成本至少是数万亿美元，完全可以支付重大核事故引起的损失。所以，从经济和人员损失的角度来说，核电都应该远好于燃煤。100 年内，就算发生几次重大核事故，整体来说，核电还是合适的。如果再考虑环境、运输等方面的好处的话，核电更有优势。

这里要注意，有些人可能会觉得以太阳能、风能为代表的新能源可以取代核能。太阳能、风能因其不稳定性，虽然可以作为重要的能量来源，但不太可能成为主要的、可靠的能量来源。

七、应该如何看待核能

上面我们已经看到，至少与煤炭相比，核能无论从经济上，还是对人类社会更好。那我们如何看待核能巨大的潜在危险呢？毕竟，一次失控核事故，将释放可以杀死几亿人的放射性。

首先，不可能有几亿人挤到破坏了的反应堆边接受核辐射，随距离增加，危害能力衰减很快。其次，放射性随时间指数衰减。第三，我们本来就在时时刻刻接受辐射，有些高海拔地区的人接受的辐射量本来就比低海拔地区的人高几倍。辐射剂量比本底增加几倍乃至几十倍对人体没有明显危害。第四，除了甲状腺癌，辐射并不明显增加别的癌症和出生缺陷数目，而甲状腺癌有很高的治愈率。另外，100 年内，我们完全可以期望医学继续快速发展，提高癌症治愈率，从而将核事故的损失降低到最小。

想象一下，几十万年前，原始人刚学会用火。

火对当时大多数人来说，是一个可怕的东西。当时几乎所有的动物都怕火，现在也是这样。火对野生动物来说，非常可怕。它会烧伤人，烧伤的人非常难受。但火也有好处，可以带来温暖和光明，使人类可以在恶劣的自然条件下生存；可以驱赶野兽；还可以煮熟食物，让食物容易消化，这样食物来源更广泛；煮熟食物还可以杀死很多细菌病毒，从而减少生病；火烤熟的食物也非常可口。但是如果有人想把火带回到大家住的洞穴里来，还有很多风险。比如可能睡着了滚到火边被烧伤；小孩容易被火烧到；火势失控；通风不好引起缺氧，“造成大规模人员伤亡”；无论冬夏，都要去外面捡很多柴火，“引起资源和环境问题”，等等。干旱季节火的危险更大，“可以大面积摧毁人类赖以生存的家园”，造成巨大的灾难。因为如果森林被烧了，食物就没有了，生态要几年几十年才能恢复，而对于采集时代的人们来说，几乎没有“战略粮食储备”，这是灭顶之灾。

大家可以看出，利用核能的好处和问题和我们祖先几十万年前用火是类似的。古人是否也曾有激烈的辩论，我们不得而知。但我们可以确信的是，古人最终掌握了火。火成了文明的象征，成了划分人与动物的标志之一。火有没有给人类带来痛苦？一定有，而且很多。人类历史上的大规模火灾，或者战争用火，造成了大量人员伤亡。但是如果不用火，世界上就不可能出现那么多人，不可能分布在那么广的区域。所以对于人类这个物种、或者人类文明来说，用火带来了大规模的发展。用火的过程也许是曲折的。可能有部落用火就发展起来了；有些部落用火造成了灾难；有些部落开始没有用火，后来学会了用火；也可能有些部落一直都不用火，在与自然和其他部落的竞争中处于劣势，慢慢灭亡。为了限制火给人类社会带来的危害，我们采取了一系列办法，包括制定消防法规，加强消防宣传，开展消防演习等。

能源是社会发展的绝对刚性需要，在今后的几万几十万年内，核能足以满足这一要求。一两百年之内，更安全清洁的聚变核能也应该能够发展起来了，这样以后上千万年都有了能源保障，人类可以专心地发展下一层次的文明。

八、如何看待现有核能技术的安全性

中国因为核能发展较晚，堆型总地来说更安全。现有的二代半技术其实已经非常安全。三代技术还

没有经过验证, 长期来看要比二代、二代半安全, 但考虑到尚无运营经历, 初期的安全性个人觉得不会比二代半更好。因为一般来说, 新系统研制和投入使用阶段是最容易出安全事故的阶段, 这时设计缺陷尚未暴露出来, 操作人员也尚未掌握规程。

因为反应堆必须在任何情况下保证冷却, 所以三代技术强调在失去外部动力下堆芯的冷却保障, 虽然比二代技术有所改进, 但是没有本质地改善核能的安全性。前一段国内媒体在宣传第三代特别是 AP1000 安全性时有一个奇怪的现象, 那就是一面倒全是厂商的广告词, 而这些广告词是由作为业主和管理方的核电管理和运营部门说出来的。我们有些太好说话了。

国内也有单位认为自己的技术属于第四代, 绝对安全。实际上该技术还非常不成熟, 还很多问题需要解决。该技术虽然研究人员作了很多工作, 取得了一些成果, 但目前所有研究基于一个非常小的实验堆, 离实际运营有非常大距离。且该堆型功率不能做大。堆小了, 成本高, 数量大, 核反应堆显然不适合到处放。

个人认为, 要全面评价新一代反应堆的安全性, 那种百万分之一、千万分之一的分析是不够的。核反应堆建成后要工作五六十年, 甚至八十、一百年。一百年内, 很多看起来很小概率的事情可能发生。比如如果真的像有些人预测的那样, 21 世纪中叶海平面要上升几米的话, 沿海核电站的安全性都要大打折扣。如果我们决定大规模采用核能, 达到 21 世纪末 300~400 个堆的水平, 必须做好发生一到两次大规模核事故的准备。

九、其他风险

除了技术方面的风险以外, 核反应堆还会带来别的一些风险。

核电站对军事攻击和有组织地蓄意破坏是没有办法的。在核能为社会主要能源的情况下, 在受到威胁时停堆也不是一个好的选择。但如果都是核能国家, 相互之间的攻击也不太可能。希望核时代的世界更和平一些。恐怖活动的问题要复杂一些, 但一般恐怖组织没有那么大的行动能力。

另一个问题是核扩散, 也就是原子弹原料太容易获取了。这其实也有解决办法, 核武器毕竟还是有高的技术壁垒。以后控制核扩散的技术和管理方式也会改进和发展。

另一个风险是, 气候变化、核电厂所在地地质变化等原因引起设防标准降低。这需要定期评估所有电站的安全性, 做出相应安排。

十、应该做好哪些准备

如果我们决定大规模利用核能, 则整个社会都要做出改变, 以适应核能社会的到来。

管理方面, 应该加强安全监控, 成立全国性应急处理小组。加强紧急事故处理演练。协调跨学科跨部门的相关研究和规范等, 控制厂区附近人口和产业规划等。我国以前的核能是直接和国防挂钩, 没有建立完善的民用核能管理体系, 主要表现就是没有相关法规。

法律方面, 明确核电厂的安全责任和事故赔偿责任, 建立核安全强制保险体系, 储备足够的社会资源应对可能发生的恶性核事故。立法可以参考消防、交通安全方面的法律。核能安全管理常态化, 正规化。

国际政治方面, 世界人民应该变得更理性、更和平, 推崇发展而不是战争。作为主要的核国家, 应该尽力维护世界和平, 并建立核安全机制。

技术方面, 包括新堆型的安全设计, 提高安全裕度。危机应对相关技术, 比如防辐射机器人技术, 远程控制技术等开发。

医学方面, 包括辐射相关疾病的治疗和控制, 癌症治疗和预防, 出生缺陷控制等。要全面加强涉核医学研究。

社会和公众教育方面, 要告诉公众全面的核能和核辐射知识, 在核电厂址附近社区中开展广泛的核教育、制定疏散规划、定期疏散演习等。

科学方面, 加快聚变核能研究, 尽快进入聚变核能时代, 从而彻底解决能源问题。

十一、总结

核能有巨大的优势, 也有很大的风险。相对于它的巨大贡献, 对整个社会来说, 风险还是处于可控制的范围。还可以采取很多措施降低核能的风险, 科学和技术进步也可以减轻核事故的危害。即使在 100 年内发生一到两次大规模核事故 (这一事故概率已经远远超过现阶段核反应堆的设计值), 相对于燃煤带来的社会代价, 危害还是要小很多。

在聚变核能大规模投入使用之前, 如果需要取代煤炭, 还有相当长一段时间必须使用裂变核能。即使聚变核能开始运用, 也还将有一段很长的过渡

深切缅怀何泽慧院士

我国著名物理学家，中国科学院资深院士，中国人民政治协商会议第五、六、七届全国委员，空间科学学会原常务理事，中国科学院高能物理研究所原副所长何泽慧先生，因病于2011年6月20日在北京逝世，享年97岁。

何泽慧1914年出生于江苏苏州。1936年毕业于清华大学物理系，1940年在德国柏林高等工业大学技术物理系获得工程博士学位。她于1940年进柏林西门子工厂参加磁性材料的研究工作。1943年，到海德堡威廉皇家学院从事原子核物理研究。首先观测到正负电子碰撞现象，被*Nature*称为“科学珍闻”。1946年，她赴法国巴黎同钱三强结婚，并一起在法兰西学院原子核化学实验室和居里实验室工作，合作发现了铀核裂变的新方式——三分裂和四分裂现象，在国际科学界引起很大反响。

1948年，何泽慧同钱三强一起回到祖国，参加北平研究院原子学研究所的组建。新中国诞生后，她投入了中国科学院近代物理研究所的创建工作。



时间。在今后的一两百年，或者更长的一段时间内，人类社会将是一个裂变核能为主的社会。建立一个安全的核能社会，需要全世界人民共同努力。

几十万年前，虽然知道火的危险，我们的祖先还是选择了火，使人类完成了由动物到人的转变。这一伟大的选择使人类能够走出摇篮，足迹遍布全球，支持人类先继完成农业革命，工业革命，信息革命。如果没有使用火，就不会有今天的我们在讨论是否应该利用核能。到了21世纪，这种化学之火已经不够用了，无法支持人类进一步的发展。如果我们选择了核能，我相信，在过几十年之后，当人类的足迹遍布太阳系，或者走得更远的时候，我们的后代会肯定我们的选择。

(北京大学物理学院 100871)

作者简介

雷奕安，1968年出生于湖南桂阳，1989考入北京大学物理系师从曾谨言先生，1995年毕业获理论物理博士学位。同年进入中国科学院理论物理研究所

于1956年研制成功了性能达到国际先进水平的原子核乳胶，获得1956年度中国科学院奖。

1964年，她担任原子能所副所长，1965年赴河南参加社会主义教育运动。“文化大革命”中，被作为“反动学术权威”受到错误的审查和批判；1969年，下放到“五七”干校参加农业劳动。

1973年，何泽慧担任高能物理研究所副所长，在她的倡导与扶持下，在西藏建成了世界上海拔最高(5500米)的高山乳胶室；还发展了高空科学气球，并相应地发展了空间硬X射线探测技术及其他配套技术。

1980年，她当选为中国科学院学部委员。直到耄耋之年，她仍然坚持全天上班，继续关心着我国高能物理和核物理事业的发展。

何泽慧院士的一生为我国的科教事业做出了重要贡献。她的逝世，是我国科教界的重大损失。她高尚的爱国主义情操，孜孜不倦、毕生以求的科学探索精神，严肃认真、自强不息的工作态度，谦虚谨慎、诲人不倦的治学态度，是我国后辈科技工作者的楷模。

所进行原子核理论研究。1997年博士后出站回到北京大学物理系任教至今。工作期间，分别于2002年初到2003年7月到内布拉斯加林肯大学工作，2007年1月到4月在加州大学尔湾分校访问，2010年2月到5月在洛斯阿拉莫斯国家实验室访问。目前主要从事量子力学基本理论，原子核理论，高性能计算，聚变理论与模拟，能源技术方面的研究。

①核反应产物中有一部分碘135，它衰变为氙135，半衰期约6个半小时。还有一小部分氙135是直接裂变产生的。氙135的热中子吸收截面非常大，能够降低中子浓度，引起反应率下降，所以叫氙毒。正常运行时，氙135的浓度是稳定的，它吸收一个中子嬗变为稳定的氙136。当反应堆功率下降时，中子浓度下降，氙135的浓度比该功率下稳定运行的浓度高，这样就会多消耗一些中子，进一步降低反应堆功率。四五个小时才能达到新的平衡。如果这时想提升功率，正常情况下是等多余的氙135消耗掉，需要几十个小时。反应堆功率提升时，情况相反，多余的中子降低了氙毒浓度，从而使中子浓度更高，反应堆功率也就更高。氙毒带来了正功率系数（与功率变动正反馈），是核反应堆非常忌讳的。