

## 第一章 能源新葩——核电

### 一、时代的灾难

1965年11月9日，在美国发生了一起重大的事故，它震撼了整个纽约及其附近的其他城市。西方报纸都在显著位置上刊载出题为《时代的灾难》、《世界的末日》等文章，广播电台和电视台也用大量时间报导事故详情。

究竟发生了什么事？原来，横跨美国和加拿大的一根次要的输电线发生了故障，致使其他一些并联输电线路断开。接着，故障像雪崩似的一个接一个发生，结果迫使总容量达4500万千瓦的发电站纷纷停止供电。几百公里范围内的电力网终于彻底瓦解。美国东部八个州和加拿大两个省的几千万居民失去了电力供应。

没有了电，便没有了光明，也没有了动力。

整个晚上，纽约市笼罩在一片黑暗和混乱之中。由于交通信号灯不亮了，车祸不断发生。交通因大街阻塞完全中断。公共汽车、无轨电车、小汽车排成了长龙。地下铁道中的列车也被“冻结”在黝黑的隧道中部。

断电还使通风和地下水抽吸系统停止了运行。

事故发生在交通“高峰”时刻，下班的人们被困在电梯里。因为空气不畅通，电梯变成了闷热窒息的密封罐。

一切电动机和电气设备都停止了运行。冷藏库因断电而失效。工厂工艺流程遭到破坏，铁水凝固，操作中断，甚至引起火灾。

有人却趁火打劫。而警察根本无法履行职责，因为通讯联络也已中断……几小时内，纽约和其他几个城市全部陷入瘫痪状态。人们落入了可怕的境地。直到次日，各发电站陆续恢复工作后，情况才开始好转。

这次事故，损失惨重。不少人受伤、致残，甚至死亡。有些人则因房屋被大火席卷而失去了栖身之地。保存在冷藏库中的几万吨食品开始变质，只好作为垃圾清理掉……

这次事故清楚地表明，一个现代化城市的生存和发展与电能的供应关系多么密切。

### 二、呼唤新能源

20余年过去了，人们对电力的需求不仅丝毫不减，反而更加依赖它了。由于电能输送方便，电器使用简单，如今电已经深入到人类日常生活的每个角落。电饭煲、微波炉、电热灶代替了煤炉；电热水器、电淋浴器代替了开水壶。电视机、冰箱，空调器，以及各式各样的新型电器产品，不断改善着人们的生活。

然而，真正需要大量电能的不是各家各户，而是工农业生产。钢铁厂、水泥厂、化肥厂、有色金属冶炼、农业灌溉和排涝等，像鲸吸水一样消耗着大量的电能。各国政府都把能源开发作为发展经济的基础，将电力建设当作头等大事。发电厂的烟囱像雨后春笋般的矗立起来，煤炭、石油、天然气等大量一次性能源滔滔不绝地从地下采掘出来，以满足人类日益改善的物质和精神生活的需要。

现在，人类驾驭能量的规模已经相当庞大。由于大规模地使用能源，不

少地区开始出现能源危机。

随着物质文明的发展，人类对生态环境的破坏也达到了比较严重的程度。大量二氧化碳排入大气造成“温室效应”。地球在二氧化碳的覆盖下会吸收阳光的能量而逐年升温。当温度上升到使极地的冰山全部融化时，全球的海平面就会上升，淹掉大部分工业发达、商业繁荣的沿海城市。

“未来学”学派认为，如果人类社会继续按目前的势头发展，那么到下个世纪中叶，由于资源，尤其是能源的限制，人口和产品会转而急剧下降，而环境污染则急剧加重，文明社会随着开始凋谢……

为了避免这种真正的“时代的灾难”，我们只有两条出路：一条出路是非常节省地使用地球上剩下的能源资源，另一条出路是尽快地开发和利用能取而代之的强大的新能源。

### 三、美妙的设想

人类为寻找能源曾绞尽脑汁，留下过很多美妙设想。

地理学家们知道，每秒钟有 8.8 万立方米的海水从大大西洋经直布罗陀海峡流入地中海，然后在那儿蒸发掉。而流动的水只要有落差就可用来发电。因此早在本世纪初就有人建议，用水坝将直布罗陀海峡拦住，把地中海的水位人为地降低 200 米，这样建在直布罗陀海峡上的水电站就可以发出 1.2 亿千瓦的电力。

人们还想利用地球本身来发电。具有磁场的天体旋转时，由于电磁感应，会产生电动势。我们的地球每 24 小时旋转一圈。如果利用地球作为天然发电机的转子，南北极成为正的接线端，赤道成为负的接线端，则理论上可获得 10 万伏左右的电压。利用这种异乎寻常的发电机，就可以把地球巨大的转动能分出一部分来供人类使用。

还有过一个利用中微子能量的设想。中微子是天体核反应中产生的一种中性的基本粒子，它的质量几乎为零，但却具有能量。从太空落到大地上的中微子流，按功率计，不亚于太阳能。由于中微子与物质的相互作用很微弱，因此中微子流可以自由地穿过云层，来到地球上供我们使用。但它同时也能轻而易举地穿透整个地球，重新进入太空，使我们失之交臂。因此，要利用它，必须想办法在中微子经过我们身旁时把它留住……

这些方案理论上无懈可击，这些能量客观上也都存在，但最终都没能付诸实施。原因在哪儿呢？原来，我们人类在利用能量时，对能源的品质有一定的要求。如果不符合这些要求，使用起来就不那么得心应手，甚至会增添麻烦。

### 四、谁能不负众望

从现代化生产的角度来看，一种理想的能源至少要符合四点要求。

首先，它应当是源源不断的，是能量的“源”泉。这类能源有两种：使用掉以后还会在短期内重新产生出来的能源，如风能、水能等，称为可再生的能源。可再生能源要及时利用，否则也会白白流失掉。还有一种在短期内不能再生出来，用一点少一点的能源，如煤炭、石油等，称为不可再生的能源。不可再生能源是古代动植物的残骸，经过亿万年的演变而逐渐形成的化

石燃烧。因为它们的储存量较大，所以才能源源不断地开发出来供人类使用。

其次，能源应当是比较便宜的。也就是说当人们使用它时付出的代价是可以接受的。在古代社会里，利用能源的方式十分原始，要求也不高。人们用木柴来烧烤猎获的野兽，用动物的脂肪来照亮幽暗的洞穴，一起挤在冬天的阳光下取暖。利用这些自然形态的能源，在当时不需要花太高的代价。这些天然存在的、未经人类加工的能源，如阳光、木柴、煤块等，统称为一次能源。然而到了今天，社会大生产的精细分工对能量的使用提出了各种特殊的要求，因此必须对一次能源进行改造，将它们转变成二次能源。我们日常生活和生产中使用的电能、汽油、焦炭、煤气等都属于经过加工的二次能源。二次能源还包括氢气、火药、乙炔、甲醇等等能贮存和放出能量的化学物质。

除了加工外，还要对能源进行采集、运输、转化，并分配到各个使用能量的地方，这是一个庞大复杂的工程。一种能源是否能够在国民经济中得到发展，并站住脚根，归根到底，取决于建成这套工程所花的代价。

符合上面两点要求的能源品种很多，煤、石油、太阳能、风能、核能都可以用。然而，基于当前工农业生产用能的特点，如今对能源还有第三个要求：能源的能量密度必须很大。由于生产用能的规模有了巨大的发展，金属冶炼、机械制造、农业生产、交通运输等部门，每天消耗着几百万千瓦的电能，只有高度密集的能源，才能满足工农业突飞猛进的发展需求。

按照第三点要求，所有一般的能源都要退居一旁，而把冠军让给裂变的原子。在能量密集方面，其他能源都是无法和核能竞争的。按照原子裂变的原理建造的核电站，它的单套机组的最大功率目前已达到 150 万千瓦，足以满足一座现代化城市的用电需要。

除了要求能源具有上述三点品质以外，对能源还有更为重要的一点要求：它不会给生态环境带来有害的影响。

近年来由于不重视生态保护，人类活动已在全球规模上造成一些严重的后果。对热带雨林滥加采伐，破坏着大气中氧的平衡；非洲沙漠不断扩张，使它剩下的沃土有五分之二将变成不毛之地；亚洲将有三分之一，拉丁美洲将有五分之一的地方步其后尘。大型火电站排出的废热使很多大河的水温猛增，影响了水生生物的生长。水电站的建造影响着鱼类的回游繁殖。泄漏到空气中的氟利昂致冷剂正在破坏地球高空的臭氧层，使人类暴露在强烈的太阳辐射之中。污浊的大气威胁着人类的生存……

各种能源对生态环境造成的影响差别很大，一些常规的动力工程，如火电站、水电站等等，从生态学的角度来看是不够理想的，有的甚至就是污染环境的罪魁祸首。与它们形成鲜明对照，不断制造放射性物质的核动力，却是一种生态学上十分干净的新型能源。它在生态学上的优越性仅次于日趋匮乏的天然气。

根据以上四点要求对各种能源进行全面考查，现在越来越多的有识之士认识到，正是核能代表着动力事业发展的新方向，它能帮助我们克服种种危机，迎接文明社会面临的各种新挑战。

## 五、地球的收支帐

460 年以前，伟大的航海家麦哲伦和他勇敢的水手们历尽千辛万苦，用了 3 年多时间，完成了第一次环球航行。当人们张大嘴巴，睁着惊诧的眼睛，

听他们介绍美丽的异国风光、富饶的沿海岛屿、热带丛林中的冒险经历、惊涛骇浪里的生死搏斗时，大家开始感觉到我们的地球是多么的巨大，在它里面蕴藏着的资源无穷无尽，足以让子孙万代生生世世地享用下去。

然而，今天，当宇航员坐上宇宙飞船，只用 1 小时左右的时间，就绕地球一周时，大家心目中的地球已经明显地缩小了。人们不由自主地开始考虑：我们的地球究竟有多少资源可继续慷慨地供我们挥霍使用？又需要多少能量才能保证人类社会继续繁荣昌盛呢？

在我们这颗行星上，现在生活着 50 亿男女老少。根据统计，我们每年消耗的能量约为  $0.27Q$  ( $Q$  是一个新的能量单位， $1Q$  相当于燃烧 360 亿吨标准煤所释放的能量)。这个数字还将随着人口的增长和生活质量的改善而继续增长。

据估计，100 年以后全世界的人口最终将稳定在 120 亿左右。那时，全球的能量需求将是多少个  $Q$  呢？

经过详细的分析，动力学家们认为，到了 2100 年，由于矿物资源日益减少，人们不得不转向开发品位较低的贫矿（品位是指矿物的含量），这样取得每吨原料所需的能耗将会显著地增加。为了养活众多的人口，人们将在土地上大量使用化学肥料以增加作物产量，还要大面积地实行人工灌溉，以开垦原来不适于耕作的荒地。这样一来，每吨粮食所需的能耗也将大幅度地提高。由于石油短缺，那时的交通工具得用新的燃烧（很可能是氢气）来代替。生产氢气要比开采地下的石油复杂得多。更令人头痛的是，这时地球上的淡水资源也不够了。很多地区得像现在的海湾国家那样，消耗大量的能量来淡化海水。

此外，还有一个不容忽视的情况。我们每年开采出来的煤、石油、天然气，以及各式各样的矿产多达数百亿吨。经过利用和加工，最后只有 1~2% 变成了制成品，其余都成为废物而进入了生物圈。为了防止我们美丽的地球变得污秽不堪，使人难以忍受，我们还要增加一大笔能量开支，用于对废物进行适当处理。

这样一算，到那时，要让 120 亿居民达到工业发达国家的现有水平，我们全球每年的能量需求大概为  $7.2Q$ 。

现在让我们回头来看一下地球的家底。我们可以把地球上不可再生的能源看作地球几亿年来的积蓄，把可再生的能源看作地球每年的收入。下面两张表告诉了我们地球的积蓄和收入状况。

我们已探明的不可再生能源的储量是十分有限的，总共只有  $23.8Q$ 。它已很难满足日益增长的能量需求。即使把地下埋藏的资源全部挖掘出来，总计也不超过  $400Q$ ，至多只能供人类节省地使用几百年。由于这些资源在其他工业领域（如化学工业）中也有重要用途，因此今天更必须综合平衡，节省使用。

可再生能源总计在一起，可得到一个相当可观的数字，约为  $2Q$ /年。但实际使用中，除水能外，其他各种能源过于分散，经济上至今得不偿失，对解决大规模的能量需求起不了重大作用。

那些我们习惯使用的常规能源并不能满足子孙万代的需要。为了获得持久的能量供应，必须把立足点移到强大新能源的开发上来。现在最有希望的新能源有两个，即太阳能和核能。

## 六、取之不尽的能量宝库

太阳在 1 秒钟内辐射的能量大约为  $3.8 \times 10^{33}$  尔格，相当于“滴嗒”一声爆炸了 900 亿颗氢弹。由于不断放出能量它每天要“瘦”掉 4000 亿吨。这种热核反应已经进行了 500 亿年。根据恒星演化的理论推算，太阳正处在壮年时期，它至少还可以工作 80 亿年左右。在这以后，它将经历一个辉煌的红巨星阶段，然后渐渐熄灭，成为一颗冰冷密实的白矮星。

地球从太阳“截获”的能量只有它辐射能量的二十亿分之一。这个数量比世界各国所有电站生产的能量大 10 万倍。来自太阳的热能平均每年约为 5300Q。可惜的是，这笔巨大的财富地球没能照单全收，其中 30% 几乎立即就反射回太空去了。

大规模利用太阳能，在技术上和经济上目前还没有重大突破。夏天阳光充足的南方地区有很丰富的太阳能，但需要供暖的却是阴冷北方的隆冬季节。这样一来，太阳能的供应和需求在时间和空间上常常是错位的。要使太阳能成为全球性的能源，满足未来世界对能量的需求，必须建立一个能够远距离输送并长期贮存太阳能的动力系统。方案之一是大规模地建造太阳能电站。但是这种电站价格昂贵，技术复杂，需占用大量的土地。根据预测，建造同样功率的电站，太阳能电站所需的钢材为煤电站的 12 倍，为核电站的 17 倍，所用的水泥则为各种电站的 60~100 倍。

按照专家们的估计，大约还需要 50 年左右的时间，太阳能才能可能在全球范围内被大规模地使用。从目前能源供应的紧张状况来看，太阳能发展的脚步，已慢了几拍，它不能填补最近几十年内即将出现的能源缺口。

现在，科学家们已经普遍承认，无论从近期或远期来看，最为现实的出路是利用核能，因为它的部分技术已经成熟，而且前途无量。核能源与其他能源不同，它不是地球的一种积蓄，也不是它的一种收入。核能的燃料——铀、钍、氘、锂，在开天辟地时就存在于地球的大气圈、水圈和岩石圈内。虽然它们也是一种不可再生的能源，然而其数量是如此丰富，实际上构成了人类取之不尽、用之不竭的能量宝库。

## 七、小巫见大巫

科学家们为了开发这个宝库，已经创造性地工作了近一个世纪。为了把禁锢在原子核内的能量释放出来，要利用一种称作核反应堆的设备，在那里有控制地进行重原子核的裂变反应或轻原子核的聚变反应，使核能一点一点地转化为热能。再利用这些热能烧出蒸汽，推动汽轮发电机发电。这样的工厂就是核电站。

还有一种鼎鼎大名的释放核能的装置，那就是原子弹和氢弹。在那里发生的是不受控制的裂变反应和聚变反应，就是让原子核内的能量一下子释放出来，这实质上是一次威力极大的爆炸过程。

受控的核反应与不受控的核反应之间有重大区别，我们以后还要仔细地加以说明，大家千万不要将它们混为一谈。

目前世界上所有核电站，都是按裂变反应的原理工作的，所用的主要核燃料是一种重元素——铀。铀在门捷列夫元素周期表上排在第 92 位。这种银白色的重金属，拿在手里沉甸甸的，比铅还要重 65%。尽管在日常生活中我

们很少遇到它，但实际上它以各种化合物的形式，广泛地分布在自然界中。在地壳的岩石圈内，每吨土壤平均含铀 1 克左右。在海水中铀占十亿之二。把非常分散的铀收集到一起，要花很大的力气。只有当矿石中的铀含量超过千分之一时，人们才乐意进行开采。

原子物理学家对铀进行了仔细的研究，发现天然开采的金属铀中，有 0.7% 的金属铀原子量为 235，其余 99.3% 的金属铀原子量为 238。由于铀—235 和铀—238 都放在元素周期表的同一个位置上（第 92 位），因此被称作同位素。它们在化学性质上毫无区别，但核物理的性能却大不一样。在一般的反应堆（热中子反应堆）内，只有铀—235 能发生裂变反应，铀—238 则不能。铀—238 必须在一种更先进的反应堆（快中子反应堆）内转化成人造元素钚—239 以后，才能发生裂变。除了钚—239 以外，可裂变的人造元素还有铀—233，它是由钍转化来的。钍在自然界中只有一种同位素钍—232。铀—238 和钍—232 经过转换，都可以成为核燃料。

可裂变的重原子核内蕴藏的能量十分巨大。1 千克铀—235 全部裂变时放出的能量相当于 2700 吨标准煤。这些煤足以装满整整一列火车车厢。

释放核能的另一条途径是轻原子核的聚变反应，它是宇宙中经常发生的一种能量转换过程（如太阳中发生的过程）。但在地球上，人类至今还不能对这一反应进行有效的控制。可控的聚变反应有待突破。目前最接近成功的是氘（音“刀”，用字母 D 表示）核和氚（音“川”，用字母 T 表示）核的聚变反应。氘和氚都是氢的同位素，它们的化学行为和氢完全一样，因此它们也可写成氢—2 和氢—3。氘在自然界中几乎是不存在的。聚变反应所需的氘由锂转化而成。在聚变反应中，锂的作用与裂变反应中的铀—238 和钍—232 相似。

轻核发生聚变时放出的能量相当于同等重量的铀裂变时所放出的能量的 4~5 倍，因此聚变反应具有更大的威力。

氘在自然界以氘水的形式存在，这种水又叫重水。从一浴缸的海水中可提取出一茶匙的重水，当这些重水中的氘全部聚合后，释放出来的能量相当于燃烧两浴缸汽油。根据计算，在全世界烟波浩渺的海水中，氘的总蕴藏量高达  $3.8 \times 10^{20}$ ，它实际上为核能的生产提供了雄厚的物质基础。

地球的积累和收入与它天赋的能量相比，那时我们今天所奢望的 7.2Q/年的能量消耗水平，该是一个多么寒酸的数字！

## 八、珠联璧合的地方

在与浩瀚东海相通的杭州湾北岸，有一座滨海的小县城——浙江省海盐县。根据《汉书》记载，那里曾观测到“五星如联珠，日月如合璧”的美妙天象。从字面上看，“五星联珠”是指五颗星排在一条直线上，“日月合璧”是说太阳和月亮叠在一起，冉冉升起。古人把天象中的“珠联璧合”附会为国家祥瑞之兆，把能看到这种吉象的地方视为神佑之邦。因此，从晋代起，就有人在那里屯兵积粮，认为在那里扎下大营，会受到神灵的保护。直到现在，每年农历十月的朔日，还有很多人爬上海盐县附近的山顶，去观看这一著名的景色。

80 年代初，一批核动力专家来到海盐县，登上东南角一条不太显眼的山岗——秦山。他们也是来观赏奇景的吗？不！他们忙的是另外一件事。他们

攀登上这布满荆棘的山丘，为的是确定我国第一座核电站的厂址。

经过多年的努力，1991年12月15日，秦山核电厂第一次把原子能转化为电力，并将它源源不断地送入我国的华东电网。那天晚上你一定开亮过电灯，可你有没有想到过，从那时开始，照耀着你的已有来自原子核内部的光辉？

为什么要选择海盐秦山来建造核电站呢？这块谷地究竟有什么魅力能赢得核动力专家的青睐呢？充满求实精神的科技人员当然不相信奇异的天象，他们选择秦山谷地作为我国大陆核电站第一厂址，是因为秦山在地质、地貌、水文、交通，以及环境保护等方面具有优越的条件，符合核电站对厂址的各种严格要求。

## 九、得天独厚

秦山核电厂三面环山，一面濒海。圆柱形的高大建筑物，是安放核反应堆的主厂房，又叫安全壳。它是一个非常坚固的钢筋混凝土圆筒，壁厚在1米以上，由成千上万吨钢铁和水泥浇灌而成。因此，这个厂房要求地基能承受每平方米60吨的重量，并且在核电厂的整个寿期内不能产生差异沉降。秦山谷地恰好具有这样的条件。对山体进行适当开挖后，整个厂房直接座落在基岩上。这里地质构造稳定，地震烈度很低，可保护主厂房稳如磐石。

安全壳近旁的长方形建筑物是汽轮发电机厂房，里面的设备和普通火电厂相似，但尺寸要大得多。

从主厂房往前看有一片平地，上面整齐地排列着许多小车间，它们是为主厂房服务的。这片平地原先是经常被海水淹没的滩涂。经过设计人员的精心安排，用开挖山体得到的土石方修筑了一条海堤，才从海水中夺得了这一片土地。

厂区周围高低参差的重峦叠嶂，恰好成为厂区和居民村之间一道完美的天然屏障，把含有大量放射性物质的反应堆及外面的厂房包在山峦之中，并面向辽阔的海面，大大地增加了当地居民的安全感。

还有一些看不见的地下和水下设施，秦山谷地也为这些设施提供了十分便利的条件。例如，核电厂运行时需要大量的冷却水，多达每小时7万立方米。这些水是经由一个穿山的涵洞，从海平面下的一个取水口中汲取的。那里基岩裸露，岸坡陡峭，水道深而稳定，可以汲取到深层的低温海水。核电厂所需的淡水则是由附近的长山河供给的。那里新建了一个自来水厂，生产的淡水足以满足生产和生活的需要。

核电厂运行中产生的放射性废物（包括废水），都贮存在厂区的地下建筑物内。这些建筑物能有效地防止放射性物质泄漏到环境中去。

大家还可以看到，这里没有常规电厂里必不可少的铁路专用线。对核电厂来说，装入反应堆的核燃料可以烧整整三年，而一炉燃料总共只用40吨二氧化铀，因此就没有必要建造铁路线。建厂期间所需的设备、器材，是通过公路或水路运送来的。附近的沪杭公路和金山卫码头，都为核电厂大型设备的运输和装卸立下过汗马功劳。

当然，我国大陆第一座核电站建在浙江省海盐县，不仅仅是由于这些技术上的原因。如果我们把视野再放宽一些，把视角再提高一些，从我国能源供求的全局观点来考虑，就会明白，选择这个厂址建造核电站，还有更为实

际的经济背景和深远的战略意义。

从全局来看，我国和面临能源饥荒的某些发达国家不同。我国是一个能量资源比较丰富、能量消费比较节制的国家。

我国已探明的煤炭储量有 7200 亿吨，按照目前的开采量，可供全国人民使用 1000 年。除煤炭外，我国还有丰富的石油和天然气，石油产量排在世界第六位，天然气产量排在第十三位。我国水力资源也十分丰富，蕴藏量达 5.38 亿千瓦，居世界首位。如果能开发其中的一半，也有 3 亿千瓦左右，相当于我国全部电站设备总容量的 4 倍。

然而，我国能源的分布情况却不理想。适于开采的煤炭资源，大部分集中在北方，所以一直得“北煤南运”。水力资源大多集中在西南地区，那儿地质条件复杂，交通闭塞，即使把水力资源开发出来，也得“西电东调”，解决电能的远距离输送问题。而迫切需要能源的沿海地区，却无法自给。

华东地区科学技术发达，资金、劳力密集，历来是我国工农业生产的重要基地。根据预测，到 2000 年，这个地区的用煤量约为 1.1 亿吨，而区内生产的煤炭只到这个数字的 40%，其余都要通过铁路从山西省运来。目前华东地区每年要输入发电用煤约 1000 万吨，这已使铁路运输处于十分紧张的超载状态。因此，由于运输上困难重重，依靠输入煤炭来发展电力，有可能使电力供应的缺口越来越大。只有同时开发其他能源，尤其是核电，才能扭转这一颓势。

在华东电网的端点——浙江省海盐县，建造第一座核电站，为华东地区能源结构的改造迈出了决定性的第一步。现在，国家正在秦山开始第二期核电工程建设。

## 第二章 探索核能脚步

### 一、“布丁中的葡萄干”

为了深入了解先进的核能技术的工作原理，让我们先去微观世界遨游一次，认识一下那巨大的能量究竟藏在原子核内的什么地方，科学家们又是如何找到开启这座能库的钥匙的。现在，让我们退回到 100 年前……

19 世纪末 20 世纪初，科学幻想创作空前繁荣。当时的科幻著作中，几乎可以找到人类的各种梦想：巨大的宫殿式的水下船舶能以前所未有的速度在五大洋中游弋，笔直地穿过极地几千千米的冰壳；结构极为奇特的飞行器，能把人们从一块大陆带到另一块大陆，甚至环绕地球整整一圈；威力无比的大炮把人射上了月球；火箭把勇敢的探索者送上了另外一些星球世界；有一种设备，能够让人不用导线而进行远距离的谈话，同时还能看到自己的交谈者；一些特殊的药片，能在极短的时间内，将一些无害的兔子变成一群可怕的巨兽；藏在火柴盒内的一种神秘的化学物质，足够供一艘军舰开动好几年……

当年所幻想的事物，相当一部分已变成了今天的现实。当时为实现这些梦想，科学家们耐心细致地做了大量实验，历尽坎坷，终于取得了辉煌的成果。

在这普遍高涨的科学潮流的推动下，曾经有三个重大发现，奠定了原子时代的起点。这就是：

1. 贝克勒尔于 1896 年发现了放射性；
2. 查德威克于 1932 年发现了中子；
3. 哈恩和斯特拉斯曼于 1938 年发现了铀核的人工裂变。

这些发现大大改变了人们对物质构造的认识。19 世纪后叶，科学家们确信，自然界中千变万化的一切物质，都是由为数不多的基本元素以不同方式组合而成的。这些元素从最轻的元素氢开始，到最重的元素铀为止。有少数元素当时还没有找到，俄国化学家门捷列夫已预见到它们的存在，并英明地在他自己发明的周期表中为它们留出了空位。

人们原先认为，任何一种元素，原子是最小的、不能再分割的微小颗粒，小得难以想象。即使本身小到几乎看不见的微尘，也是由几亿颗原子组成的。由一种或几种原子组成的复杂物质的最小颗粒则叫做分子。分子虽然同样微小，却保存着这种物质的全部特性。分子经分解，可回复为组成它的各种原子。这时，原来物质的特性也随着消失。任何化学变化，都只能把复杂物质分解为纯粹的化学元素，或将各种元素组成新的复杂物质，却没法创造出新元素。

中世纪的炼金术士，曾想把水银或铅转变为黄金，根据上面的结论，这种愿望是永远不会实现的。

后来，对电的研究有了新进展。英国物理学家汤姆逊设计了一个真空管通电试验，发现阴极射线在磁场作用下会发生偏转，由此证明电并不是像原先认为的那样，是一种流动的液体，而是由一些极小的带负电的颗粒——电子构成的。他很快地测定了电子的质量，发现它的质量只有最轻的氢原子的  $1/1836$ 。多次试验表明，电子具有当时已知的最小电荷量  $e^{-1}$ ，它大约等于  $4.8 \times 10^{-10}$  静电单位。

电子的存在使人们开始意识到，原子不是物质最终的、不可再分割的单元。而电子肯定是原子的组成部分，已有好几种方法可从原子中取得电子。例如，用紫外线照射金属时，从金属中跑出来的带负电的粒子，同汤姆逊测定的电子具有完全相同的性质。

学者们认为，原子就像一个实心的圆球，均匀地布满了正电，而负的电子就镶嵌在充满正电的圆球之中，有点像“布丁中的葡萄干”。原子中电子所带负电荷的总数，永远等于整个球中正电荷的数值。只有当原子失去一个或几个电子以后，它才变成带正电的“原子”——正离子。这就是 1898 年提出的原子结构模型。然而，没有人能够解答，原子中带正电的那部分物质究竟是什么？原子中是否还存在着像负电子那样的正电颗粒？

## 二、暗斑图像的秘密

19 世纪末，德国物理学家伦琴在研究阴极射线时，发现了一种看不见的射线，它能穿过不透明的物质，使某些晶体发出荧光，或使照相底片感光。对当时的人们来说，这是十分奇妙的。伦琴自己也无法解释这一光线的本质，因此把它叫做 X 射线。

法国物理学家亨利·贝克勒尔听到了关于伦琴发现 X 射线的消息，也想研究这些奇妙辐射的起源问题。他想起有一些物质在普通光线照射下会发出荧光，就很想知道这些物质是否也同时在发射肉眼看不见的 X 射线。

他决定用在太阳光会发出最强烈荧光的硫酸铀酸钾的晶体来进行这个试

验。他把未感光的照相底片用黑纸包起来，然后在纸包上面撒一些晶体，放在窗外的阳光下。太阳的紫外线使这些晶体发出了荧光。几小时后，贝克勒尔把纸包取回，将照相底片显影。按他的推断，如果晶体在太阳照射下发出 X 射线，那末 X 射线应能穿透黑纸而使底片感光。如果没有 X 射线，那末黑纸挡住了所有的可见光，底片就应保持不曝光状态。试验取得了很大的成功，他在底片上放置晶体物质的地方，果然看到了灰色的暗斑！

1896 年 2 月 24 日，他向科学界宣布他发现了由光线引起的类似 X 射线的射线。

可是几天以后贝克勒尔发现，他搞错了。

当时，由于天气阴沉，没有阳光，他把准备好的铀晶体和底片收到抽屉里，一连等了好几天，天气仍未放晴，他就用这些底片作了别的用途。当他将底片显影以后，出乎意料地发现，底片上居然也有这些铀晶体的暗斑图像，而且更深更黑。这就证明了，在没有光线的地方，晶体也在发出自己的射线。

贝克勒尔一次次用不同类型的荧光物质进行实验，结果证明他试验过的每一种物质，只要含有铀，都会放出这种射线。看来铀是关键物质。要使铀发出穿透性的射线，既不需要可见光，也不需要紫外线。他终于用纯铀作了一次试验，发现这次射线比以往任何一次都更为强烈。

铀的放射性现象的发现，带来了原子内部的第一个信息，成为 20 世纪的新物理学的起点。贝克勒尔的成就吸引了全世界学者的注意力，也包括当时就在他的实验室中工作的杰出的波兰女科学家玛丽·斯克洛道芙斯卡娅。她就是后来蜚声学术界的居里夫人。

居里夫人研究了贝克勒尔所发现的、在铀射线作用下空气会改变自己导电能力的现象后，想搞清楚是否还会有另外一些物质也能使空气具有导电能力……结果发现，氧化钍的放射性甚至超过金属铀的放射性。

后来，居里夫妇两人进行了艰巨的努力，把沥青铀矿中的放射性物质分离了出来。他们发现，这种由氧化铀中分离出来的物质含有未知的、性质近似于铋的金属，居里夫妇称它为钋。

接着，居里夫妇又发现了一种极为强烈的放射性物质，其化学性质与钋有明显的区别。他们称它为“镭”。

以后，其他科学家又发现了一些放射性物质。人们开始明白，放射性在自然界中的分布，要比科学家们过去所设想的广泛得多。它是某些物质固有的一种属性。

物理学家们通过试验很快了解到，放射性物质放出好几种射线。一种是带正电的粒子流，称为 α 射线。它的质量大约是氢原子的 4 倍，实质上就是氦原子。第二种是带负电的粒子流，称为 β 射线，实质上就是运动得很快的电子。第三种是穿透性很强的类似于 X 射线的 γ 射线，这是一种频率极高的电磁波。

放射性元素在放出射线的同时，本身也发生“衰变”而成为另一种元素。例如镭放出 α 粒子和 γ 射线后变成氡。氡是一种放射性气体，它还会放出 α 粒子而继续衰变。

放射性的发现至少说明两个问题：第一，原子不是不可分割的，否则就不可能从其内部放出粒子或射线来。第二，原子内部一定含有很大的能量，否则这些粒子和射线就不可能具有如此高的运动速度或动能。

根据测定，1 克镭每小时放出的能量达 136 卡。如果把它放在一杯 0 的

冰水中，大约 6 昼夜就可将水加热到沸点。1 克镭全部衰变后放出的热量为 28 万千瓦，这大约相当于 375 千克优质煤。可以想象，当人们意识到在不到半节手指头那么大的物质中，藏有如此巨大的能量时，该是多么地受鼓舞啊！

物理学家们更加忙碌起来了。他们希望把这些能量的释放过程置于自己的控制之下。可惜的是，无论他们用什么办法，提高温度也好，改变压力也好，都不能改变这些核素释放能量的速度，它们不紧不慢地按照自己固有的速度进行衰变。

### 三、炮弹换来金钥匙

尽管人们对放射性现象的本质的认识还很模糊，但不少学者已经想到，可以利用这些高速运动的粒子作为武器，来研究原子的内部结构。

英国物理学家卢瑟福用  $\alpha$  粒子作为炮弹轰击原子核，期望用它来揭开原子内部的秘密。其中有一部分试验是这样进行的：在窄束的  $\alpha$  粒子的前进方向上放上一张金属薄片。根据汤姆逊模型，如果原子是一个实心的小球，那末  $\alpha$  粒子通过金属箔时，即使不能把金属原子轰开，也会与它们发生千万次碰撞而改变自己的路线，从金属箔后飞出来的粒子应具有各种不同的方向。

然而试验的结果却完全不是这样。以每秒 2 万千米高速前进的  $\alpha$  粒子，除了少数发生角度的偏转和反弹以外，大部分毫无阻碍地穿过金属箔，几乎不改变自己的直线前进方向。

这个试验说明原子不是实心的球体，更不是“带葡萄干的布丁”。原子的大部分是“空”的。它的全部正电荷和质量都集中在一个很小的体积内，其断面大约只有整个原子断面的十万分之一。正因为这样，原子允许  $\alpha$  粒子通行无阻，只有当  $\alpha$  粒子恰好碰到原子核时才发生偏转或反弹。

如果把原子比作地球，那末电子就只有在地球表面上滚动的“足球”那么大，而带正电的原子核，相当于地球中心的一个直径为一二百米的“核”。对原子来说，除了滚动的“足球”和密实的“核”以外，其他地方都是空的。各个原子的“核”本来应挨在一起，由于电荷之间存在斥力，才使它们之间保持着很大的距离。如果把原子核紧挨着排列起来，则 1 立方厘米纯粹的核物质，其重量将达到 11400 万吨！

卢瑟福据此提出了一个新的原子结构的模型——质子—电子模型。他认为原子类似于一个缩小了的太阳系，中间是质子组成的核心，外围是一群绕核旋转的电子。质子带有一个正电荷，质量为电子的 1836 倍，因此原子核几乎集中了原子的全部质量。然而，这个模型有一个明显的漏洞，因为除了氢原子核为带一个正电荷的质子以外，其他所有元素核内的电荷数，并不等于核内的质子数。例如氦原子核带 2 个单位正电荷，但质量却相当于 4 个质子。如果它是由 4 个质子组成的，那末其中有 2 个质子的正电荷到哪里去了呢？

在研究放射性现象时，学者们曾认为原子核内除了质子以外，还有电子，它们可以中和那些多余的质子电荷。衰变过程就是一个例证，在  $\beta$  衰变时，从放射性元素的核内飞出了真正的电子。

然而奥地利物理学家泡利通过实验证明，电子是不可能核内独立存在的。这样，学者们只好假定，核内还存在另外一些粒子，其质量与质子相同，但没有电荷。1920 年，三个物理学家在三个不同的国家提出了这个想法。他

他们是英国的卢瑟福、澳大利亚的马森和美国的哈金斯。哈金斯甚至为这种尚未发现的粒子起了一个名字，他把它叫做中子。但是，此后 10 多年间，这个设想一直没有得到证实。

1930 年，德国物理学家博特和他的合作者贝克尔，用  $\alpha$  粒子轰击轻金属铍，预期用  $\alpha$  粒子能从铍原子核中打出质子来。可是没有出现质子，却发觉有另一种辐射。这种辐射贯穿力极强，甚至能穿透几厘米厚的铅板。根据当时的认识，由靶物产生的各种形式的辐射中，唯一能贯穿厚铅层的只有  $\gamma$  射线。所以博特和贝克尔断定，他们得到了  $\gamma$  射线。

1932 年，居里夫妇重复了博特和贝克尔的实验，得到了相同的结果。不过，他们在辐射的路径上还放上了石蜡作试验。石蜡是由碳和氢两种轻原子构成的。他们惊奇地发现，新的辐射从石蜡中打出了质子。从来也没有发现过  $\gamma$  射线具有这样的性质，但他们又想不出这种辐射还能是别的什么，因此，就以为发现了  $\gamma$  射线的一种新功能。太可惜了，他们已经站在了发现中子的门槛上，却又退了回去，没能进入这一新的科学殿堂。

英国物理学家詹姆斯·查德威克了解这些情况后指出， $\gamma$  射线没有质量，因此不可能具有将质子从原子核中击出的能量。而电子太轻，也不可能做到这一点。因此，这一定是一些本身就相当重的粒子，可能是中性粒子。但如何确定它的质量，证明它是中性粒子呢？

由于当时发明的质谱仪等仪器无法测定中性粒子的质量。查德威克想到了利用弹性碰撞的理论，即用相同速率的中性粒子，分别去轰击含氢物质和含氮物质，根据被击出的氢核和氮核的速率，可以求得入射粒子的质量。结果测得这种粒子的质量与氢核的质量几乎一样。这就证明了的确存在着一种质量与质子相等的中性粒子。根据哈金斯当年的建议，查德威克把这个新发现的粒子命名为中子。这一年是 1932 年。由于发现中子，查德威克荣获了 1935 年的诺贝尔物理奖。这也是他探索了 12 年获得的成果。

中子的发现在当时的物理学界引起很大的反响，但丝毫没有受到社会的注意。只是 13 年后，在日本广岛上空爆炸了第一颗原子弹时，人们才理解到，发现中子意味着什么——中子是开启核能宝库的一把金钥匙。

#### 四、炼金术梦想成真

根据查德威克的发现，伊凡宁柯和海森堡为原子核提出了一个新的“质子—中子”模型：原子核是由质子和中子组成的。如果一个原子核包含  $x$  个质子和  $y$  个中子，那么它的原子序数就等于  $x$ ，而它的质量数（即核的原子量）就等于  $x + y$ 。

例如氢原子核里有一个质子，它的原子序数是 1，原子量也是 1，可写成  ${}^1_1\text{H}$ 。氦原子核里有 2 个质子和 2 个中子，它的原子序数是 2，原子量则是 4，可写成  ${}^4_2\text{He}$ 。当时周期表中的最后一个元素是铀。它的原子核里有 92 个质子和 146 个中子。它的原子序数是 92，而原子量则为 238，故可写成  ${}^{238}_{92}\text{U}$ 。按照质子—中子模型，任何元素的原子量都应接近一个整数。相对于原子，核外电子的质量很小，可忽略不计。

然而，化学家们早已从实验中了解到，绝大多数元素的原子量都是带有小数值的。例如已经测定氯的原子量为 35.5，这个“0.5”是怎么回事呢？

要知道原子核里是不会有半个质子或半个中子的。

事情原来是这样的。天然氯中含有两种氯元素：一种氯元素原子量是 35，核内有 17 个质子和 18 个中子；另一种氯元素原子量是 37，核内有 17 个质子和 20 个中子。这两种氯元素具有相同的质子数，其外层具有相同数量的电子，因此在化学性质上几乎没有任何区别。由于原子序数相同，它们在门捷列夫周期表内被安排在同一个小格内。这些原子量不同，在周期表内占有同一位置的核素，人们称它们为同位素。氯的两种同位素就是  ${}_{17}^{37}\text{Cl}$  和  ${}_{17}^{35}\text{Cl}$ 。

同位素在元素中所占的百分数称为该同位素的丰度。天然元素中各同位素的丰度是相当稳定的。天然氯元素中， ${}_{17}^{35}\text{Cl}$  的丰度为 75%， ${}_{17}^{37}\text{Cl}$  的丰度为 25%。它总是以这个比例参加各种化学反应。因此，它的化学原子量就等于 35.5。

利用质子—中子模型还可以很方便地解释各种核素的放射性衰变现象。例如铀—238 衰变时会放出一个  $\alpha$  粒子（即氦核），这就相当于失去两个质子和两个中子。于是它的原子序数要减 2，它的质子数要减 4。铀—238 ( ${}_{92}^{238}\text{U}$ ) 就变成了钍—234 ( ${}_{90}^{234}\text{Th}$ )。

除此以外，我们还知道，有相当多的放射性核素是进行  $\beta$  衰变的。放出一个  $\beta$  粒子就相当于放出一个电子。然而物理学家泡利证明过，电子在核内是不可能单独存在的。那末这究竟是怎么回事呢？这里我们可以把中子看成是质子和电子的复合体。当放射性核进行  $\beta$  衰变时，核内有一个中子分解，放出一个电子而留下一个解脱了的质子。例如钍—234 原子核里有 90 个质子和 144 个中子。放出  $\beta$  粒子后，中子减少一个，质子增加一个，于是钍—234 ( ${}_{90}^{234}\text{Th}$ ) 就变成了钋—234 ( ${}_{91}^{234}\text{Po}$ )，后者含有 91 个质子和 143 个中子。

核素的放射性衰变是自发进行的。它需要多长时间进行衰变，衰变成什么元素，都是不受人的意志控制的。使物质中的放射性核素衰变掉一半所需的时间称为“半衰期”。各种核素都有各自固定的半衰期，从若干分之一秒到成千上万年，不受外界一般条件的影响。稳定核素的半衰期就是无穷大。科学家们认识到，要改变这种局面，必须依靠“核”反应。这种反应发生在原子核内，而不是像化学反应那样，只是发生在原子核外的电子壳层之间。

当用各种粒子与原子核进行碰撞时，粒子有时会被核吸收，有时会从核内击出另一些粒子来，通过这种核反应可以人工地制造出新核素。这种核反应也可用质子—中子模型来解释。

第一个人为地使原子核发生变化的先驱者，是英国物理学家卢瑟福。他在 1919 年用  $\alpha$  粒子去轰击氮—14，结果氮—14 放出一个质子而变成了氧—17，首次实现了中世纪炼金术士的梦想：在人的意志下，使一种元素变成另一种元素。物理学家利用各种粒子对不同的元素进行轰击，诱发核反应，结果生产出了 1000 多种在自然界里并不存在的原子核。

现在看来，要用其他物质炼出黄金并不是不可能实现的愿望。关键是要“凑”到适当的质子数和中子数。当原子核中的质子数为 79 时，我们就可得到黄金的各种同位素。它们中有的带放射性的。只有当核内的中子数为 118 时，才能得到稳定的、与天然开采的黄金完全一样的金原子 ( ${}_{79}^{197}\text{Au}$ )。

炼金术士的愿望是将其他物质转变为黄金，而物理学家感兴趣的，是原子核内蕴藏着的巨大能量。

卢瑟福用各种粒子“大炮”对原子轰击了 14 年，试图揭开了原子核内部能量之谜，当没有取得什么进展时，他曾惋惜地宣称，人类可能永远无法使原子能在经济上获得巨大效益。然而，他的结论下得早了一点。中子的发现使事情出现了转机。

## 五、从混乱的顶峰上下来

查德威克发现中子，给物理学家添置了一种研究原子核的新武器。由于中子没有电荷，不会受到电场的排斥或吸引，因此它能平静地穿过原子的电子壳层，接近任何一个带正电的原子核，从而增加引起核反应的机会。费米最早开始用中子作为炮弹，去轰击各种元素，结果成功地制造出很多种人工的放射性核素，并且发现，其中许多核素都是进行衰变的。

地球上存在的最重的天然元素是铀。费米想，如果用中子去轰击铀核，铀吸收一个中子后发生衰变的话，将会出现什么结果呢？原子核吸收一个中子又放出一个 $\beta$ 粒子（即电子），相当于核内增加了一个质子。也就是说，由第 92 号元素铀变成了第 93 号“超铀元素”。这个“超铀元素”应该是一种放射性元素。否则，人们早已在地球上稳定元素的行列中找到它了。

费米的实验获得了成功。铀经中子轰击后，产生了前所未有的新的放射性。这种放射性由成分相当复杂的射线所组成。这是否就是“超铀元素”的特征呢？

德国科学家哈恩和梅特涅对“超铀元素”进行了详细研究，又细致地分析了各种衰变的半衰期，发现“超铀元素”有好多种。

在法国，伊伦娜（居里夫人的女儿）和她的丈夫也在进行中子轰击铀的实验。他们发现在“超铀元素”中有一种半衰期为 3.5 小时的放射性物质。可以用化学方法将它与钢分离，但无法将它与镭分离。因此这种放射性物质与其说是钢的同位素，到不如说是镭的同位素。

后来，哈恩和斯特拉斯曼又做了进一步研究，在经中子轰击过的铀中，不仅找到了镭的类似物，同时还找到了钡的类似物。这时，在经中子轰击过的铀中，发现的放射性物质的总数已达 16 种之多，而“超铀元素”的混乱程度也达到了它的顶峰。

物理学家梅特涅和弗里施据此得出结论：铀原子核在中子作用下发生了分裂。铀核俘获一个中子时，就取得了额外的能量。它会像冲击波似的使铀核发生振荡。有时候铀核振荡以后又能恢复原状，将这个中子收容下来，随后发射 $\beta$ 粒子放出多余的能量，而成为超铀元素。但有的时候，铀核会因振荡而伸长，逐渐变成哑铃状。这时，短距离内起作用的核力已无法把它拉回原来的形状。由于正电荷之间产生强烈的排斥作用，铀核就分裂成了两半。其电荷和质量大致相等地分给了这两个碎片。两个碎片带着巨大的动能向相反的方向飞去。铀核裂变的碎片是多种多样的。哈恩和斯特拉斯曼所观测到的钡和镭，就是铀的碎片。

物理学家们很快测定到了铀核裂变时所放出的能量，它大约相当于 200 兆电子伏，其中 80% 以上转化成了裂变碎片动能，其分配情况如表 4 所示。这里 1 电子伏的能量是指 1 个电子在 1 伏的电场内加速时所获得的能量。1

兆电子伏 $=1.6021 \times 10^{-6}$  尔格。

在直径不到  $10^{-12}$  厘米的原子核内部包含着如此惊人的能量，对物理学家来说，既是意料之外，又属情理之中。德国出身的伟大科学家爱因斯坦，早在 1905 年就为这种能量释放现象提供了坚实的理论基础。他根据自己的“狭义相对论”断言，可以把质量看作是能量的一种存在形式，而且是一种非常密集的存在形式。质量和能量可以互相转化。为了定量地描述两者的关系，他天才地提出了著名的质能转换关系式：

$$E = mc^2$$

式中 E 代表能量，单位尔格；m 代表质量，单位克；c 代表光速，单位厘米每秒。根据这个公式立即可以算出，1 克质量就相当于  $9 \times 10^{20}$  尔格的能量。

这个关系式在一般的能量释放过程中是很难检验的。例如当一个碳原子与氧化合成二氧化碳时，放出的能量只有 4.1 电子伏。它所引起的质量变化是微乎其微的，根本不可能进行测定。然而铀核裂变时释放的能量却有 200 兆电子伏，显然有可以感知的质量变化伴随发生。

精细的分析证明，铀核实际上以 40 余种不同的方式进行裂变，可以形成 80 多种放射性核素。它们的质量数大多在 72 ~ 160 的范围内，与此同时还放出 2 ~ 3 个中子。

我们不妨进行一个粗略的估算。设铀—235 吸收一个中子裂变后生成钷—95 和碘—139，并放出 2 个中子，则：

裂变前的质量数为：

铀—235	235.124
一个中子	1.009
共计	236.133

裂变后的质量数为：

钷—95	94.945
碘—139	138.955
两个中子	2.018
共计	235.918

前后相比，质量亏损了 0.215 个质量单位。一个质量单位相当于  $1.66 \times 10^{-24}$  克。根据  $E=mc^2$  可以算出，这些质量亏损所产生的裂变能，恰好相当于 2009 兆电子伏。

## 六、让火焰熊熊燃烧

铀核释放巨大能量所引起的激动心情尚未完全平复，人们就开始探索实际利用核能的方法。现在已经十分明确，要使铀核裂变必须依靠中子。然而，当时所用中子“大炮”的火力却相当微弱。它们是一些内装氦气和钨粉的小玻璃管。氦自发地放出  $\alpha$  粒子，对钨进行轰击。当钨核吸收一个  $\alpha$  粒子时，就会放出一个中子而转化为钍核。

以这种方式产生的中子炮弹，其数量是不多的，每秒约为 100 万个。即使发命中铀核，由此得到的功率也十分有限。用这种方法进行裂变，就像用一盒蹩脚的火柴点火。每根火柴要划好几次才能发火，没等到把火柴棍烧着，火焰却熄灭了。把整盒火柴都用上，也只能得到少得可怜的能量。要想

获得有实用价值的能量，必须让火柴发火以后继续燃烧，用它去点燃木柴，再用木柴去烧着煤块，靠煤块自身发出的热量逐渐点燃附近所有的燃料，这样才能燃起熊熊的炉火。这就是我们生活中常见的、在燃烧过程中所发生的链式反应。根据常识我们知道，在实际使用中还必须将链式反应保持在一个稳定的水平上，否则它一旦任意蔓延开去，也可以把一切卷入火海，造成无可挽回的后果。

铀的裂变是否也能产生这样的链式反应呢？早在 1934 年，匈牙利物理学家西拉德就发现，快中子有时会以足够大的速度打进一个原子核，使它射出两个中子。可惜射出来的两个中子能量很低，没有能力打进新的原子核，使反应继续进行下去。

发现裂变现象以后，人们肯定了铀—235 是一种极易被中子点燃的“干柴”。后来费米又指出，在重原子核中，平均每个质子拥有的中子数目，要比轻原子核中多一些。因此，如果一个重核分裂成两个轻核，就会出现多余的中子，铀核裂变很可能本身就能提供新的中子。

事实果真如此。经过仔细的测定，每个铀核裂变时，平均放出 2.54 个中子。也就是说，根据裂变的方式，有时放出 2 个，有时放出 3 个中子。这些裂变中子显然可作为“炮弹”引起新的裂变，并产生新的中子，从而形成持续的链式裂变反应。换句话说，原子火焰在点燃了以后，可以依靠它自身的条件继续燃烧下去，从而从铀原子的内部取得源源不断的能量。

然而由于裂变时产生的 2~3 个新中子运动速度很快，达到每秒 20000 千米，这些快中子与铀核发生相互作用，并引起裂变的机会是很小的。实验室装置中，大部分新产生的中子尚未击中铀核，就逃窜到空气中，或被其他物质吸收掉。

要保持链式反应，就要求每次裂变产生的中子扣除损耗后，至少还剩下一个中子去击中另一个铀核。后来，科学家建造了一种能使链式裂变反应受控制地持续进行的装置，称为反应堆。在反应堆中，这一代剩下的有效中子数，与上一代引起裂变的中子数之比，称作中子的增殖系数，习惯上用符号  $K$  来表示。当  $K$  大于 1 或等于 1 时，链式反应就能持续地进行下去。当  $K$  小于 1 时，反应就会终止。

要使  $K$  增大，理论上有好多种办法。首先是设法增加中子与铀核发生作用的机会。为此，得让中子放慢脚步。当中子的速度降到与常温下分子运动的速度相接近，即每秒 2200 米时，它在铀核附近逗留的时间就加长了，因而它使铀核发生裂变的本领，就会大大增强。这样的中子叫做热中子。按这种原理工作的反应堆，称作热中子反应堆。

要使快中子慢化成热中子，最好的办法是让它与质量相近的原子核进行弹性碰撞，例如让它与水中的氢原子、石墨中的碳原子、金属中的铍原子进行碰撞。这种在反应堆内用来快速降低中子速度的物质，叫做“慢化剂”。

增加  $K$  值的另一个方法是，增加核燃料的数量。新产生的中子数目与核燃料的体积成正比，而泄漏出去的中子数与核燃料的表面积成正比。增加核燃料的数量，体积的增长超过表面积的增长，就可使中子的泄漏相对减少一些。

要使  $K$  值保持在 1 以上，对裂变物质的数量有一个最低限度的要求。这个最低限度的质量叫做临界质量，相应的体积叫做临界体积。所以大量存放核燃料时，必须分散堆放，以免达到临界体积而发生链式反应或核事故。原

子弹在引爆前，它的几块核炸药也是分开旋转的，只是在引爆时才把它们压紧在一起。

临界质量或临界体积与核燃料系统的组成及几何形状有密切的关系。如果核燃料系统的组成中含有很多能吸收中子的核素，则临界质量就要大大增加。因此在设计反应堆的堆芯部分时，要使用很少吸收中子的材料，例如铍、石墨、重水等。

占天然铀中大多数的铀—238 很少参加裂变反应，反而要吸收掉一部分中子。只有铀—235 具有在慢中子（热中子）作用下发生裂变的本领。因此提高核燃料中铀—235 的浓度，可以减少临界体积。

在体积相同的所有各种几何形状中，表面积最小的是球形。如果用纯铀—235 制成一个圆球，它的临界质量大约为 50 千克，直径约 16.8 厘米。但作为空运的核武器，有没有办法使它更小型化一些呢？办法是有的，可以在铀—235 球外包上一反射层。它能把一部分逃出去的中子重新反射回来。那时，临界质量大约可降到 17 千克左右，直径降到 12 厘米以下。这种反射层技术也应用在核反应堆上。

## 七、酒瓶商标纸上的记录

裂变现象的发现前后经历了 5 年时间。当时是 1939 年，第二次世界大战已经迫在眉睫。由于裂变现象是在希特勒统治的国家——德国发现的，人们担心，希特勒可能会利用这一物理学上的最新成就来发动战争，甚至利用原子能来生产某种爆炸物。

当时有许多科学家从欧洲来到美国，他们特别忧心忡忡，担心德国人首先制造出原子武器。

严峻的形势迫使科学家们对链式裂变反应做进一步研究。他们决心赶在纳粹德国之前掌握核能。经过艰辛努力，这一愿望终于实现，而希特勒德国在它灭亡之前，却始终未能造出原子武器。

1939 年 9 月，第二次世界大战在欧洲摆开了战场。与此同时，经爱因斯坦、西拉德等科学家的积极奔走，原子能研究终于得到了美国政府的支持，开始秘密地进行。负责这项研究工作的是著名原子物理学家费米和西拉德。

费米在接受试验任务时，手头上并没有纯粹的铀—235，甚至连浓缩铀也没有。他只好用含铀—238 99.3% 的天然铀作核燃料。铀—238 这种核素虽然在快中子作用下会发生少量裂变，但主要是吸收中子而形成超铀元素。铀—238 俘获中子以后，先放出  $\gamma$  射线转变为铀—239。铀—239 不稳定，它放出一个电子以后转变为镎—239。镎—239 再放出一个电子转变为人工核燃料钚—239。钚—239 在快中子和热中子作用下都能发生裂变，而且较易提纯，其性能比铀—235 还要好一些。它与浓缩的铀—235 一样，是核武器的一种重要原料。

可是，反应堆内将产生的钚，却帮不了费米什么大忙。他必须用天然铀中少得可怜的、总共只占 0.7% 的铀—235 来实现这一创举。

经过一年的研究，他们决定用石墨来作中子慢化剂。根据计算，他们至少需要几千吨高纯石墨。他们把石墨块切成一定的规格，然后互相拼接起来。一层又一层地垒成一个大堆。在石墨块之间还按一定方式放入了铀块，这就是世界上第一个反应“堆”。

50 年后的今天，反应堆的结构形式有了很大的变化。例如，秦山核电厂的压水堆，实际上是一个厚壁的钢容器，内部是各种极为精密的结构，包括核燃料、慢化剂、反射层等所有与链式反应有关的部件。它的外形与“堆”已毫无相似之处，但我们仍称它“堆”。

1942 年 12 月 2 日 8 时 30 分，大约有 20 个人聚集在芝加哥大学的室内网球场上，他们将首次点燃原子的火焰。

三个年轻人爬到反应堆的顶上。这是最危险的地方。他们的任务是：如果核反应失去控制，就把一种能大量吸收中子的镉液灌注到反应堆内，以扑灭可能发生的原子大“火”。

另一名科学家站在反应堆的旁边，他的任务是在费米的指挥下，操作一根插在反应堆内的主控制棒。这根棒也是由镉制造的，未开堆时，它大部分都插在堆芯里。由于镉可以吸收掉大量中子，因此反应堆才能保持在亚临界状态。根据计算，当这根棒大部分抽出反应堆时，反应堆内就开始链式裂变。

10 时左右，费米下令把两根由电气操纵的控制棒从堆内抽出，接着一点一点地抽出那根主控制棒。每当主控制棒往外抽出一些的时候，盖克计数器的脉冲计数声音就响得快一些。费米迅速地作了一些计算，然后要求再抽出一些。实验正在按照预计一步一步地进行着，11 时 35 分，突然轰隆一声，原来由电气操纵的自动控制棒落下来了。由于安全保护点设置得太低，这根控制棒提前“行动”了，链式反应没有发生。

午后，对自动控制棒的安全定值作了一些调整后，一切又从头开始。下午 3 时，主控制棒抽出的长度已超过了上午的数值。这时，计数器响得更欢了。大家都意识到，庄严的一瞬即将来临。

费米让操纵者把控制棒又抽出了约 0.3 米多，这时，记录仪开始画出一条向上扬起的曲线，标志着链式反应已正式开始。

链式反应大约进行了半个小时。随后，费米就下令把镉棒插回反应堆里。计数器慢下来了，记录仪的描笔也下降到了原始位置，反应停止了。

这时，人们心潮澎湃，激动万分。对于这一人类征服自然的伟大历史事件，没有人给科学家们拍照。他们分享了一瓶自己带来的庆功酒。然后在酒瓶的商标纸上签上了每个参加者的姓名。

今天，人们来到芝加哥大学进行访问时，都可在足球场西看台下面找到这个室内网球场。在这座建筑的外墙上，有一块朴素的纪念碑，上面写着：1942 年 12 月 2 日，人类于此首次完成持续链式反应的实验，在可控的核能释放上跨出了第一步。

### 第三章 色彩缤纷的核电世界

#### 一、在爆炸声中跨入原子时代

费米建成的反应堆大约持续生产了半个小时的核能，它的功率只够点亮一盏小电灯泡。然而这一成就表明，人类已能够迫使原子核交出能量，并把释放的过程置于自己的控制之下。

可是，战争的需要注定这一辉煌的科学成就暂时不能用来为人类造福。就在费米建造第一座反应堆的同时，美国政府开始在洛斯阿拉莫斯全力以赴地研究制造和引爆原子弹的技术。

1945年7月16日凌晨5时30分，在洛斯阿拉莫斯以南320千米的新墨西哥州的沙漠里，爆炸了第一颗原子弹。数量不多的裂变物质——铀发生了瞬时链式反应，释放出自古以来就隐藏在原子核内部深处的巨大能量。它的爆炸力相当于20000吨梯恩梯炸药。由于对爆炸的威力估计不足，科学家们呕心沥血研制出来的不少珍贵仪器都被震坏，学者们感到心痛不已。

科学家们曾以为，核能的释放，会给人类带来一个美好的时代，战争将被消灭，出现普遍的富裕，便宜的能量会帮助人类去实现各种大胆设想。但是只经过了几个星期，就发生了使所有人感到震惊的事情。

当时战争马上就要结束，成败已定局。考虑到战后政治斗争的需要，美国政府决定使用原子弹。

1945年8月6日，在日本广岛上空，美国的B—29型轰炸机扔下了绰号为“小男孩”的铀弹，使这个城市60%的地区遭到破坏，日本当局估计有71000人死亡和失踪，68000人受伤。3天以后，这样的惨象再次重演，在日本长崎上空爆炸了绰号为“胖子”的钚弹。由于崎岖不平的山谷起到了屏障作用，这座城市只被炸毁了44%。根据美国战略轰炸统计局估计，约有35000人死亡，60000人受伤。

善良的人们在广岛和长崎原子弹的爆炸声中跨入了原子时代。日本城市和无数居民在一瞬间毁灭的可怕情景，深深地印在人们的心中。核能的第一次实际应用，在全世界引起沉重的道义上的谴责。因此，以后核技术和核科学的发展，一直受到社会舆论的密切关注，有时甚至遭到充满成见的抵触。

## 二、粗心的估计

当人人都为原子内部蕴藏了巨大能量而感到震惊时，曾有记者问美国一些最权威的专家，什么时候可以把原子能用于和平？所有专家当时几乎都给出一个相同的数字：50年以后（即在1995年）！，但事实上，不到10年，在50年代中期，就有好几个国家建成了自己的核电站。

学者们的估计是多么的粗心啊！那末为什么他们的预测与事实竟有如此巨大的偏差呢？

原来，当时美国专家们根据核能在军事应用上的浩大开发费用推断，核电站要比火电站或水电站贵得多，因此在近期内对它不抱什么希望。

几十年过去了，事实与专家们的预计背道而驰。截止1992年6月底，世界上已有26个国家和地区拥有核电站，正在运行的核电机组已达413座，发电量总计为322642兆瓦，占世界总发电量的17%。与此同时，还有更多的核电站正在建造或订货之中。根据国际原子能机构估计，到本世纪末，将有58个国家和地区建成核电站，机组总数将达到700座以上，发电量将超过7亿千瓦。

核动力以如此巨大的规模，在全球范围内蓬勃发展决不是偶然的。今天，核电站无论在经济上，还是技术性能上，都已超过或接近常规火电站的水平。不仅能源短缺的国家迫切需要建造核电站，比较富裕的国家，如美国，为了减少对进口石油的依赖，节约使用现存的化石燃料，并减轻环境污染，都把核电的发展放在重要位置上。

在核能和平利用的道路上，反应堆专家们采用过不同的慢化剂、冷却剂、核燃料，以及结构上差别很大的设计方案，先后提出过20多种发电用的反应

堆，其中大部分已被淘汰。到目前为止，有 5 种堆型在实际应用中显示出自己的优势，它们是：石墨水冷堆、石墨气冷堆、压水堆、沸水堆和重水堆。还有一种很有前途的新堆型——快中子堆，我们将在第六章中详细介绍。

我国在核电起步的规划阶段，曾组织很多专家考察世界各国发展核动力的技术路线，借以确定我国核电站的优选堆型。根据这张表，细心的读者一定不难猜到，我们国家的核电站目前采用的是哪一种堆型。

### 三、原子锅炉和核燃料

核电站的工作原理与常规的火电站有很多相似之处，也有不少特殊的地方。

在常规的火电站中，主要设备是锅炉、汽轮机和发电机。当煤或燃油在锅炉的炉膛内熊熊燃料时，加热炉膛周围的传热管，使在传热管内流动的水产生出高压蒸汽。蒸汽汇集后通过管道送往汽轮机。汽轮机是一种转动机械，它有一根装有很多级叶轮的主轴。当高压蒸汽喷到叶轮的叶片上时，叶轮就带动主轴，像风车似地高速转动。汽轮机主轴和发电机的主轴相连，使发电机转子跟着转动，在发电机定子内就会产生出电流。此后，依靠输电线就可将电能输送到需要它的任何地方去。在汽轮机内作功的蒸汽流过各级叶轮时，其压力和温度逐渐下降，成为废汽。把废汽再凝结成水，送回到锅炉的传热管内，重新产生新的蒸汽，完成汽—水的循环过程。

核电站和火电站的不同之处是：在核电站里，反应堆代替了锅炉，核燃料代替了煤和油。利用反应堆内核燃料裂变放出的热量来产生蒸汽，然后推动汽轮发电机组，发出强大的电力。因此，核电站的反应堆有时也称作“原子锅炉”。

用原子锅炉向汽轮机供汽有两种方式。一种是在反应堆内直接产生蒸汽送往汽轮机，蒸汽在汽轮机内作功后冷凝，收集的凝结水又送回反应堆，这种汽—水循环的方式几乎与火电站完全一样，比较简单。

另外一种方式是利用某种循环流动的冷却剂，将热量从反应堆内带出来，然后进入一个热交换器，将热量传递给第二个回路。这个热交换器叫做蒸汽发生器，在那里产生蒸汽，送往汽轮机。这种供汽方式显然要麻烦一些，因为多了一个换热设备。然而，核电站设计人员舍简就繁不是没有道理的，这是由核电站的特殊性决定的。因为当反应堆的冷却剂回路（又称一回路）和汽轮机的汽—水循环回路（又称二回路）之间，有传热面隔开而互不相通时，可以防止反应堆回路内的放射性进入汽轮机的汽—水系统。

尽管核电站采用不同类型的反应堆，但任何反应堆都有一些必不可少的组成部分。反应堆内最核心、最贵重的部分是堆芯，它是由核燃料、慢化剂、冷却剂和各种结构材料组成的。

现在普遍使用的核燃料是天然铀和低浓铀，做成金属块或陶瓷块的形式。它们在堆芯内“燃烧”时，既不冒烟，也不发火。重元素在受控情况下的裂变过程是静悄悄地进行的。当原子核大批大批地发生裂变时，裂变碎片的动能使燃料块本身开始强烈地发热，有点像通上大电流的电阻元件。这时就要依靠冷却剂及时地从堆芯导出热量。在现代的大功率动力反应堆的堆芯内，每单位体积释放的能量，要比火电站中锅炉炉膛内的容积热强度大好几

百倍，因此必须精确地组织堆芯内冷却剂的流动，尽快地将热量带出来。

铀原子核分裂时并不严格对称，它以 40 多种不同的方式进行分裂。因此，直接由裂变而生成的新核素有 80 多种。它们中大部分具有放射性，会继续衰变而成为其他核素。如果把间接的衰变产物也计算在一起，裂变产物就多达 200 余种。

裂变产物地衰变过程中要放出衰变能量，它在链式反应停止以后还会延续相当长的时间。在大型动力反应堆中，衰变热的数量很大。普通火电站停止运行时，只要停止供煤或供油，把火灭掉就可以；而核电站，则在反应停止以后，还要为它的剩余衰变热而进行认真操作，及时导出堆芯内不断产生的热量，以防止堆芯因温度上升而烧毁。这是核电站运行中与火电站大不相同的地方。在后面的章节中，我们还要介绍发生在美国三里岛核电站的一次重大事故，它就是由于衰变热没能导出而造成的。

为实现链式反应，在动力反应堆内采用的慢化剂、冷却剂、结构材料，都要尽量选用不吸收或很少吸收中子的材料。在堆芯的周围，包有一反射层，目的是把逃出堆芯的中子重新反射到堆芯内，以提高中子的利用率。反射层也是由很少吸收中子的材料组成的。

反应堆中另一必不可少的组成部分，是反应性控制机构，这套机构都用能强烈吸收中子的材料制成。工程师们将这两类性质截然不同的材料，巧妙地组合在一起，构成一个矛盾的统一体，这才实现了可控的链式裂变反应。

我们已经知道，当一个中子击中铀核，使其裂变时会放出 2~3 个中子，这些中子再击中 2~3 个铀核时，会放出 4~9 个中子。这种几何级数的增长如果不加以控制，就变成了原子弹的爆炸过程。当然，在动力反应堆中，决不允许发生原子爆炸，因此在绝大多数情况下，要求把中子增殖系数  $K$  维持在 1 的数值上，只有当需要改变输出功率时，才允许  $K$  稍稍发生一些偏离。允许有多大的偏离呢？偏离后中子增长有多快呢？在这里我们又将看到核电站与火电站的根本差别之处。

在火电站的锅炉中，要提高蒸汽产量，只要多加燃料，并调节好燃料所需的空气量就可以了。而在核电站的“原子锅炉”中，必须调节的是中子的数量。

对调节中子数量，大家开始时不免有些担心。要知道，中子从产生开始，经过慢化和扩散，到引起裂变，所需的时间极短，它的平均寿命总共只有万分之一秒。这也就是说，在 1 秒钟内中子能繁殖 1000 次！就算  $K=1.001$ ，经过 1 秒钟，中子的数目也会猛增千百倍。反应堆的功率完全取决于堆芯内工作的中子数，因此功率也会猛增千百倍。要将  $K$  控制到小数点以后第三位，并在 1 秒钟内及时进行调整，这是一件多么不容易的事啊！如果不是物理学家对中子释放的特性事先作过透彻的研究，恐怕谁也不敢贸然去启动这样迅猛的反应。

使大家感到庆幸的是，经研究发现，中子并非全都是在裂变的瞬间产生的，而是有先有后。大部分中子在裂变后 10—14 秒就放出来了。它们被称为瞬发中子，约占总数的 0.65%，是在裂变产物进行衰变时产生的，这部分中子称为缓发中子，按它们缓发的时间，一般可划分为六组，各组平均寿命从 0.33 秒到 80.6 秒不等。把缓发中子也算在内，反应堆内中子的平均寿命增加了 800 余倍，也就是说功率增长的速度降低了 800 余倍。正是由于这个原因，工程师们才有较充裕的时间，能利用各种机构对中子的数目进行及时

的调整。

然而应当注意，在任何情况下，必须使  $K$  不超过 1.0065。超过这个数值，单是瞬发中子的作用，就可使中子急剧增殖，这时反应堆所处的状态称为瞬发临界状态。当出现瞬发临界时，机械式的控制机构跟不上中子增殖的速度，反应堆功率就会失控。后面我们要谈到在前苏联切尔诺贝利核电站发生的一次功率失控事故，它带来了极其惨痛的经验教训。

为了防止功率变化过快，任何的反应堆中除了有正常运行中调整反应性的控制机构以外，还有一套十分精巧和灵敏的反应堆保护装置。当功率变化过快时，它会自动起作用，使核反应立即终止。

#### 四、和平利用原子能的开端

世界上第一座正式向居民提供电力的核电站，是前苏联建造的。它是一座压力管式的石墨水冷反应堆，于 1954 年 6 月 27 日在莫斯科近郊奥勃宁斯克镇投入运行。它的热功率为 3 万千瓦，电功率为 5000 千瓦，发电效率只有 16.6%，在经济上与常规火电站相比差得很远。但它是人类把核能用于和平目的的第一个成功例子。

世界上第一个核电站用石墨作慢化剂。石墨是碳的一种六角形片状结晶。大家熟悉的铅笔芯，就是用它加上黏土制成的。天然石墨中含有许多杂质，不能用于核工业。核反应堆中使用的石墨慢化剂是人工制造的，它用石油焦或煤沥青焦作为原料，经过焙烧、提纯等多道工序，以保证它具有良好的慢化性能，并且很少吸收中子。这种高纯度的石墨，被切割成对角线为 137 毫米的正六角形柱块，堆砌在一起，形成一个直径为 3 米，高度为 4.5 米的石墨砌体。这个砌体的中心部分为堆芯，堆芯的直径为 1.5 米，高度与人的身高差不多，为 1.7 米。

这座反应堆的核燃料，是外包不锈钢的低浓铀，它套在直径很小的冷却管外面，4 根冷却管组成一根工艺管，垂直地插在石墨堆芯的孔道内。整个堆芯一共插有 128 根工艺管，另外还插有 22 根控制棒。为了防止石墨氧化，用碳钢的外壳将石墨砌体密封起来，中间充有氦气。

这第一座核电站建成以后，专家们使用它作为试验基地，开展大量的研究工作。稳定运行了一段时间以后，核动力专家和电站运行人员紧密配合，大胆而沉着地使工艺冷却管内的冷却剂一根接一根地发生了沸腾，为实现大功率石墨沸水堆开辟了光辉的前景。

60 年代，前苏联在别洛雅斯克又建成了两座压力管式石墨水冷反应堆，工艺管的数目从 128 根增加到 998 根。每根工艺管内的冷却管燃料元件，也从原来的 4 根增加到 6 根。而且让冷却水在堆内沸腾，产生的蒸汽在堆内过热。使供汽的温度和压力，完全能与常规火电站中使用的高压汽轮机相匹配。每台反应堆带两台汽轮发电机组，发电能力达到 20 万千瓦。

70 年代，前苏联在列宁格勒建造了百万千瓦级的大功率石墨沸水堆 PEMK—1000。这种反应堆堆芯的直径为 11.8 米，高为 7 米，由 2488 根石墨方柱构成，其中布置 1693 根带燃料元件的工艺管，功率达到了 100 万千瓦。它可以在不停堆的情况下，更换工艺管和与其组合在一起的核燃料，因此，大大提高了核电站有效利用的时间。这种 PEMK—1000 型核电站，成为前苏联发展核电的基本堆型之一，此后，在全苏各地陆续建成了 15 套这样的核电装置。

专家们还打算建造更加巨型的石墨沸水堆 PEMK —2400，其发电功率将达到 240 万千瓦，直接生产 500 ~ 510 的高压过热蒸汽，使电站的热效率提高到 37%。

随着反应堆尺寸的增大，结构上也将作相应的改变。整个堆芯分成很多块，每块又分成好几段。这种小的组件可以在工厂里进行预制，然后以标准化构件的形式，通过铁路运输到现场，进行组合安装。当反应堆体积十分庞大时，表面积对中子逃逸的影响就显得不那么重要了。因此，将用方形的堆芯来代替传统的圆柱形堆芯。这时，只要不断增加预制块的数目，就可不受限制地增大反应堆的功率。沿着这条技术路线发展核电，在单堆功率方面，可有较大把握创造出“世界之最”来。

然而，这种反应堆也有一些缺点。由于每根工艺管都是一个单独的核能传输单元，因此都要单独地监测和控制其运行情况，包括温度、流量、放射性剂量等等，这就使得仪表成群，信号成片，管道系统十分庞大，电站的造价便提高了。只有当功率超过 100 万千瓦，可以大量采用标准化设计和工厂组装技术时，才能使电站的建造成本降低。

前苏联除了建成一系列的石墨水冷反应堆以外，也同时发展压水堆核电站，关于这类核电站的特点，将在后面的章节中向大家介绍。

## 五、望尘莫及的高温功能

50 年代初期，能源恐慌的情绪曾像大雾一般笼罩着英伦三岛。由于煤炭资源迅速消耗，石油资源短缺，迫使英国的工业领导人急于寻找一种新的动力资源。当时英国科学家根据他们在美国参加工作的经验，设计了一种石墨气冷反应堆。1956 年 12 月，英国第一座核电站投入运行。

这种第一代气冷堆采用石墨作慢化剂，二氧化碳作冷却剂，金属天然铀作核燃料，镁合金（镁铝铍）做结构材料。

由于气体的传热能力比水差，开始时，每立方米的堆芯发出的功率只有 0.55 兆瓦，二氧化碳的出口温度只有 345 ，电站的热效率为 19.1%。这种反应堆的尺寸比较大，堆芯直径为 15 米，高度为 10 米，而且要使二氧化碳循环流动，从堆芯带出能量，要花很大的功率。为了节省自身的消耗，后来把二氧化碳的工作压力由开始的 8 个大气压提高到 20 个大气压，这时堆芯的功率密度增加到 0.8 兆瓦/米<sup>3</sup>，二氧化碳的出口温度也被提高到 400 ，电站的热效率也相应地上升到 30% 左右。

然而，想再进一步提高技术性能，却遭到了无法逾越的困难。因为金属铀和镁合金不能承受更高的温度。由于投资大，成本高，因此不得不在 70 年代予以放弃。

英国设计的第二代气冷堆，称为改进型气冷堆。它采用二氧化铀代替金属铀。二氧化铀是一种类似陶瓷的材料，耐温性能大大高于金属铀。堆芯的结构材料也改用不锈钢。不锈钢与镁合金相比，会吸收掉一些中子，因此采用低浓铀代替原来的天然铀，来补偿中子的损失。这种新的组合允许堆芯出口温度提高到 670 左右，可以产生高温高压的蒸汽，并与标准的汽轮发电机组相匹配，使电站的热效率提高到了 40%，单堆功率达到 60 万千瓦。改进型气冷堆的石墨砌体，包在一个混凝土的压力壳内，使二氧化碳的工作压力达到 40 大气压，堆芯功率密度增加到 2.8 兆瓦/米<sup>3</sup>，比第一代气冷堆高

出了 2 倍以上。

气冷堆的另一个优点是气体冷却剂可以被加热到较高的温度。气体的出口温度增高，则电站的热效率也相应提高。在改进型气冷堆中，若进一步提高气体出口温度，二氧化碳就开始与不锈钢发生化学作用。因此要继续向高温挺进，必须换用更为稳定的冷却剂和堆芯材料。

有好几个国家正致力于高温气冷堆的研究工作。在这种反应堆中，他们选用不和任何元素发生化学反应的惰性气体——氦气作为冷却剂。对核燃料的组成也进行了根本性的改革，采用一种全陶瓷型的热解碳涂敷颗粒，作为燃料元件的基本单元。这种颗粒和小米差不多大小。它的核心是直径为 200 ~ 800 微米的二氧化铀和氧化钍陶瓷材料，外面涂敷几层热解碳和碳化硅。涂敷层的厚度约为 150 ~ 200 微米，它可以在 1000 以上的高温下运行而保持其完整性。

将涂敷颗粒分散在石墨基体中，压制成燃料密实体，再将密实体装入由石墨制成的柱状（或球状）外壳之中，就成为燃料元件。

在英国和美国研制的高温气冷堆中，采用柱状的燃料元件。把几百个柱状元件布置在一起组成堆芯。燃料中的石墨既是慢化剂，又是结构材料。冷却用的氦气则通过燃料元件中的孔道，将热量带出堆芯。除了冷却剂和燃料元件不同以外，这种反应堆在形式上还保留着前两代气冷堆的基本特点。

德国研究的高温气冷堆则另辟蹊径，它采用球状的燃料元件。这种元件的外径大约为 6 厘米左右，与有些居民家里做饭用的煤球差不多大小。有趣的是，它们的燃料方式也和煤球炉十分相似。在这种反应堆中，新燃料球由堆顶装入，烧过的球由堆底的排球管排出。成千上万个燃料球，随机松散地堆积在圆柱形的石墨腔内，并达到临界体积，发生裂变反应。这种气冷堆又称作球床反应堆。当然，实际上球床反应堆和家用煤球炉还是有不少差别的。球床反应堆燃料时不需要空气。氦气作为冷却剂从反应堆的上部引入，通过球床吸收热量后，从底部引出，与煤球炉中气流的方向恰恰相反。

高温气冷堆出口的氦气，温度可高达 950 ~ 1100 。用来发电的话，可使电站的热效率提高到 40% 以上。除此以外，它还可以进行高温供热，用来冶炼钢铁，精炼石油，生产氨和甲醇，进行煤的气化，以及用热化学裂解水的方法生产干净的二次能源——氢。这种高温功能是何任何其他类型反应堆所望尘莫及的。

在高温气冷堆的堆芯中，除了核燃料和很少吸收中子的石墨以外，没有其他结构材料，因此，中子利用的程度很高，可以在核燃料中以氧化钍的形式加入部分钍—232，让它吸收中子而转换成新的可裂变燃料铀—233，从而扩大核燃料的资源。

由于高温气冷堆采用了一系列独特的工艺，相应地提出下很多需要解决的技术问题。就拿氦气冷却剂来说吧，它在化学上是惰性的，在几千度高温下也不会和其他物质发生反应，因此能与各种材料配合使用。然而这一特点竟然也带来新的麻烦。在驱使氦气不断循环流过堆芯的氦气压缩机中，由于转动部件在充满氦气环境下工作，金属表面不能生成氧化膜保护层，因此转动很容易发生磨损。

高温石墨气冷堆目前还没能作为成熟的堆型，在核能发电中广泛采用。但随着技术水平的提高，它极有可能成为最为先进的动力反应堆之一。

## 六、从核潜艇“鳐鱼号”开始

在核能发电中有一种已被广泛使用的动力反应堆——压水堆。这种反应堆也是我国核电发展规划中已经选定的主要堆型。我国已建成的秦山核电厂，还有刚建成的大亚湾核电厂，以及正在设计中的其他核电厂，都是用这种反应堆来发电的。压水堆的发展要追溯到第二次世界大战期间。当时，美国海军就曾想利用反应堆作为动力，来建造核潜艇。

战争结束后不久，美国海军部派出一个技术小组，去橡树岭实验室学习反应堆技术，带队的是一名上校，名叫里科维。回来后，他被任命为海军舰船局核动力处的领导人，兼原子能委员会下属海军反应堆处的处长。他以非凡的勇气和大胆的部署，进行了卓有成效的组织工作，1954年底建成了美国第一艘核潜艇“鳐鱼号”，从而揭开了海军发展史中极为重要的一页。

在“鳐鱼号”核潜艇中，利用压水堆作为动力源，它既安全，又可靠。由于核动力工作时不需要氧气，因此潜艇可以长时间潜航，穿过北极辽阔的冰层，进行环球航行。

1953年，美国决定建造大型核动力装置，原子能委员会把这个任务交给了里科维少将，并由西屋电气公司负责反应堆装置的建造。

1954年9月6日，压水堆核电站在宾夕法尼亚州的希平港正式破土。

经过大量的考核，1957年12月2日，希平港反应堆首次达到临界。经过16天，能量源源不断地送出。

希平港核电站的主要用途，是研究压水堆的工艺。在这第一代装置中，实际上已体现出压水堆的所有基本特点。它用加压的普通水作为冷却剂、慢化剂和反射层。整个堆芯放置在一个钢制的厚壁容器内，它能承受很高的压力，足以保证冷却剂在堆内不发生沸腾现象。

通过改进燃料组件，压水堆逐步实现了更新换代。压水堆燃料组件的改进过程是这样的：从以不锈钢为包壳的核燃料棒，发展成高功率的以锆合金为包壳的燃料棒束组件；取消了燃料盒而改用定位架，以增强冷却剂的导热效果；用控制棒束代替十字形断面的控制棒，并采用液态中子吸收剂——含硼水。随着反应堆功率的增大，还减小了燃料棒的直径，改进了燃料元件的制造工艺。这些改进措施，使压水堆堆芯的平均功率密度从58千瓦/升提高到100千瓦/升。这些数字说明，在压水堆中每单位体积的堆芯所放出的核能，要比石墨气冷堆高出40倍左右。由此可以想到，压水堆是一种多么紧凑的反应堆装置。也正是由于这个原因，使它能用在空间极为紧凑的核潜艇内。

目前典型的压水堆核燃料，是由低浓度的二氧化铀芯块制成的。圆柱形芯块的尺寸，相当于一节手指的大小。它们挨个放在壁厚约为0.6毫米的锆合金管子内，然后密封起来，组成一根长为3~4米的燃料棒。锆合金管用来防止燃料与冷却剂发生相互作用，同时把产生的放射性裂变产物保存在锆管内部。锆本身是一种极为优秀的堆芯结构材料，因为它几乎不吸收中子。

用定位架将约200根燃料棒，按正方形的栅距排列起来，组装成15×15或17×17的棒束，称为燃料组件。将上百个燃料组件安装在一起，组成一个近似圆柱形的堆芯。把它架在钢制的厚壁容器的中央，就是一个压水堆。冷却剂自下而上流过堆芯，带出裂变的能量。

由银—铟—镉制成的控制棒，通过容器的顶盖插入燃料组件之中。改变控制棒插入堆芯的深度，就可调节中子的数量，从而控制反应堆的功率。

在燃料组件不断改进的同时，压水堆核电站的系统和设备也逐渐完善，并进入了标准化的阶段。目前最大的压水堆核电站，其单堆发电能力已达 130 万千瓦。它以反应堆为中心，有四个环路，每个环路有一台蒸汽发生器和一台立式的主循环泵。高压下的水由主泵驱动，经过堆芯吸取热量，然后沿着环路进入蒸汽发生器，在那里放出热量，以后又流回主泵的入口。冷却剂不断地循环流动，完成输送热量的任务。在蒸汽发生器内，二回路的水接受热量后变成蒸汽，进入汽轮发电机组做功发电。

压水堆中的冷却剂、慢化剂和反射层都利用普通水。这不仅是因为普通水价廉易得，还因为它在常规的火电技术中已利用了 200 多年，人们对它已积累了丰富的操作经验，研制了能在高温高压汽水条件下使用的各种材料和设备。压水堆实际上最大程度地沿用了常规的发电技术，因此既经济、又可靠。目前已建成的核电站，一半以上都是压水堆核电站。将来，这个比例很可能会继续增长。

从长期运行的角度来看，压水堆核电站也有一个薄弱环节，那就是蒸汽发生器。它的传热管壁厚不到 1.5 毫米，却担负着将放射性的一回路冷却剂，与非放射性的二回路汽水介质相隔绝的重任。在长年累月的热交换过程中，这些管子是否能够不受腐蚀而保持严密，仍然是一个令人担心的问题。已有一些蒸汽发生器发生了泄漏，电站不得不停下来对它进行修理和更换。很多材料工程师和水化学专家，正在从管子材料和水的品质两个方面进行努力，希望尽量延长传热管的使用寿命。

有些核动力专家提出一种更为痛快的办法，那就是干脆取消蒸汽发生器，把反应堆的运行压力降低一些，让流过堆芯的水沸腾起来，直接产生蒸汽，这种带有一些放射性的蒸汽，同样可以送往汽轮发电机组做功发电。这就是下面要介绍的另一种主要核电站——沸水堆核电站的特点。

## 七、最强劲的对手

从反应堆内部的过程来看，沸水堆最大的特点就是在堆芯内出现了蒸汽。这些夹在水流中的小汽泡，对链式核反应究竟会产生什么影响呢？这是首先必须解决的问题。

沸水堆与压水堆相似，也用普通水作为冷却剂和慢化剂。当堆芯中一部分水被汽泡所代替时，堆芯内的慢化剂减少了，因此会使反应性有所下降。然而另一方面，普通水在堆芯内会吸收掉一些中子。当它被汽泡排挤出堆芯时，中子的损失减少了，因此又可使反应性有所提高。汽泡对反应性的这种正负两方面的影响，叫做“空泡效应”。在沸水堆的设计中，要尽量使空泡效应为负值，即当堆芯内含汽量增多时反应性下降，使功率的增长能自动地受到抑制。这种“自稳”的能力，可以增加反应堆运行的安全性。

堆芯内的大量汽泡不仅产生空泡效应，它们还处于不断的变化和运动之中。汽泡在堆芯内不断地产生出来，并与水一起流动，这个过程是非常复杂的。人们曾担心，混乱的沸腾过程和汽水流动中的不稳定现象，会不会造成反应堆失控？

经过对汽水流动的深入研究，专家们发现汽泡并不像原来想象的那样不可捉摸，对它们的运动规律可进行定量计算，从而能防止汽水流动进入不稳定的状态。因此，可以允许堆芯内出现沸腾现象，沸水堆的运行是可靠的。

最早致力于沸水堆研究工作的是美国通用电气公司。1957年10月24日，第一座沸水堆核电站——瓦莱雪脱斯核电站，在美国加利福尼亚州投入运行。其发电功率为5000千瓦。它实际上是一个试验装置，为建造大型的沸水堆核电站提供经验。

1960年8月，在芝加哥西南80公里处建成了当时世界上功率最大的核电站——德累斯顿沸水堆核电站，其电功率为18万千瓦。它以十分优异的运行记录，不仅确立了这种堆型在核电事业中的地位，而且立即吸引了国外市场。一时之间，意大利、前联邦德国、荷兰、印度、日本、西班牙、瑞士、瑞典等国家纷纷提出订货，沸水堆一时名声大振，红得发紫，并迅速地向更大的功率挺进。1969年，牡蛎湾核电站的功率达67万千瓦；1973年，勃朗斯·费莱核电站的功率已达106.5万千瓦，与当今大型压水堆的单堆功率不相上下。

沸水堆由包容堆芯的钢制容器，及与其相连的许多辅助系统所组成。水由下向上通过堆芯，然后在堆芯外围与钢容器内壁间的环形腔内下降，不断地进行再循环。堆芯中产生的蒸汽，与再循环水分离后，在容器顶部进行干燥，那里设有高效率的汽水分离装置。在环形腔内，还布置有好多个喷射器，它们的作用是提高冷却剂再循环的能力。喷射器的动力来自两台离心泵，它们从容器中吸取三分之一的堆芯流量，然后以更高的压力使它流过喷射器的喷嘴。喷嘴出口的高速水流带动环腔内的水流，一起进入堆芯进行再循环。

现代沸水堆的核燃料，采用低浓二氧化铀，铀—235的浓度约为2%。燃料在高温高压下烧结成芯块，芯块放在锆合金管内组成燃料棒。很多根燃料棒按6×6、7×7或8×8排列成正方形的燃料组件。很多个燃料组件放在一起成为堆芯。这种构造和压水堆有很多相似之处，所不同的是沸水堆燃料元件之间的间距较大，可使汽水混合物流动畅通。

沸水堆的控制棒用碳化硼制成，具有十字形的断面。由于反应堆顶部已被汽水分离装置占有，因此，十字形断面的控制棒，都由容器的底部自下而上，插到四个燃料组件之间的间隙中，这也是区分压水堆和沸水堆的标志之一。调整插入的深度，即可控制堆芯的反应性，从而调整反应堆的功率。除了利用控制棒以外，沸水堆还可依靠改变堆芯内冷却剂的流动速度来控制反应性。流动速度的变化，可引起堆芯含汽量的变化，用这种方法可使反应堆的运行功率改变25%左右。

沸水堆运行时的最大特点，是蒸汽中含有放射性。当冷却剂流过堆芯时，水分子中的元素氧—16，吸收中子后会放出质子而转变成氮—16。氮—16的半衰期只有7.35秒，在衰变时放出高能的中子射线，因此具有很强的放射性。这个现象在压水堆核电站中也存在，但氮—16只限于在一回路内循环流动。而在沸水堆核电站中，它随着蒸汽进入汽轮机装置的汽水回路，得采取措施，把汽水回路屏蔽起来，还要对所有可能从汽水系统排出的蒸汽，加以凝结和回收。

目前已运行的核电站中，沸水堆的数量仅次于压水堆，占第二位。它在热效率、单堆功率、运行的安全可靠方面，都与压水堆不相上下。在各种堆型的剧烈竞争中，它显然是向压水堆冠军地位挑战的最强劲的对手。

## 八、独树一帜

加拿大从 1952 年开始，花了一二十年时间，独树一帜地发展了一种别具特色的新堆型——重水堆。这种反应堆利用重水作为慢化剂和冷却剂，并采用天然铀作为核燃料。

重水是从天然水中分离出来的，它是重氢（即氘）和氧的化合物。其比重为 1.1，在 101.4℃ 时才沸腾，在 3.8℃ 下就开始结冰，在天然水中的含量约为 0.02%。虽然任何动物和植物都不能依靠重水生存，但它却是一种极佳的慢化剂。和普通水相比，它的优越之处在于，它几乎不吸收中子。因此，反应堆可以依靠天然铀中 0.7% 的铀—235 而达到临界。发展重水堆可以屏弃费用浩大的铀浓缩工厂。但是用同位素分离技术把重水从普通水中分离出来，同样要耗费巨大的代价。尤其在发展的初期，重水的价格非常昂贵，几乎和黄金一样。

加拿大发展重水堆经历了三个阶段。1962 年建成的第一座试验堆，电功率不到 2500 千瓦。在试验堆的基础上，1968 年，在道格拉斯角建成第二座重水堆核电站，电功率增大到 20 万千瓦。然而由于宝贵的重水发生大量的泄漏，又得不到补充，使电站几乎陷于停顿状态。在这种情况下，重水堆声誉一落千丈。但专家们没有轻易地放弃这种堆型的开发。为解决重水泄漏，他们尽量减少系统中使用的阀门数目，改善设备的密封性能和焊接技术，同时还建成了第一座大型重水工厂，来保证重水的供应。

1973 年，在加拿大又建成了皮克灵商用核电站。这个电站有四座重水堆，每座输出的电功率为 50 万千瓦。其中第四座堆从首次临界到满功率，仅用了 12 天的时间，创造了各类动力堆运行的最佳记录。由于这种反应堆可以不必停堆而进行装卸核燃料的操作，设备的利用率远远超过其他类型的反应堆。1981 年，全世界利用率最高的 10 座反应堆中，重水堆就占了 6 座。重水堆核电站的优良性能和运行成绩，使它在世界核电市场上站稳了脚根。

加拿大重水堆采用压力管式的结构，并大量地采用标准零件，增加压力管的数目就可增加单堆的功率。与前苏联压力管式石墨堆的区别是，重水堆的压力管是水平布置的，燃料的装卸也在水平方向进行。在堆的前后装有换料机构，新燃料从一头送进去，用过的燃料从另一头进行回收。因此可以在运行中进行燃料的更换。

反应堆的容器是一个圆柱形卧式贮箱，其中装有冷的重水。这些重水类似于石墨堆中的石墨砌体，起慢化中子的作用。在必要的情况下，这些冷重水可以迅速地靠重力排空，使链式裂变反应由于缺少慢中子而立即停止。在压力管内循环流动着热的重水，由主循环泵驱动，从堆芯带出热量，送往蒸汽发生器。因此，重水堆的热能传送和转化成电能的过程，和压水堆是相同的。

重水堆最吸引人的地方，是能够非常有效地利用核燃料。由于重水吸收中子比普通水少 600 倍，因此它可以用天然铀作燃料来达到临界。燃料在堆内被利用以后，其中铀—235 的浓度可以从原来的 0.72% 一直降到 0.13%。这个数字比铀浓缩工厂尾料中的铀—235 浓度还要低得多。因此，利用重水堆可以从所开采的铀中榨取到最多的能量。当生产同样多的电能时，重水堆所消耗的天然铀大致相当于轻水堆的 70%。

此外，由于采用了不停堆装卸燃料的自动化机械，它可以及时回收由铀—238 吸收中子而转换来的钚—239。在消耗同样天然铀的情况下，重水堆的产钚量为压水堆的 2~2.5 倍，这对能源的开发和利用很有意义。

重水堆对具有一定工业基础，想利用本国铀资源，但又没有铀浓缩能力的国家来说比较合适。

## 第四章 从核电站的安全说起

### 一、核电站不是原子弹

核电站与原子弹有什么区别？它会不会像原子弹那样发生核爆炸？失控的链式反应会不会使整个电站变成一个大火球，然后再再上升，形成一朵硕大无比的蘑菇云？……人们常常会把新闻电影中看到的核武器试验情景与核电站的意外事故联系在一起。

出现这样的问题并不意外，因为核能的利用一直沿着两条平行的轨道向前推进。它既可服从战争的需要，又可用于和平的目的。它们之间在技术上有很多相似之处，在工业体系上有密切的内在联系。在一个领域中取得的成就，总可以推动另一领域的进步。因此，普通居民常常将原子弹和核电站混同起来。在核能发展的早期，甚至在这方面极有修养的学者，也没有把两者区别开来。

德国著名的原子物理学家海森堡，在 1942 年初曾要德国政府相信，他们绝对有把握制造出原子弹来。然而法西斯纳粹直到灭亡也没搞清这种武器究竟是什么样的。

第二次世界大战结束以后，在德国海格洛赫村的地下实验室里，发现了德国物理学家建造的一座使用重水慢化的反应堆。这座反应堆没有达到临界，因为仅有一吨半天然铀和两吨重水，不足以实现持续的链式反应。这个发现使大家明白了，为什么德国人在理论上首先发现了裂变原因，但在运用方面却让美国人占了先。

德国学者的第一个错误，在于他们认为，只有借助重水才能建成以天然铀为燃料的反应堆，而没有想到采用高纯石墨。在那个年代里，纯粹的重水是以升来计算的。德军占领挪威以后，控制了那里的一家重水工厂，并规定该厂每月要向德国提供 120 升重水。这唯一的重水工厂于 1943 年 2 月被挪威的游击队炸毁了。好不容易使它部分地恢复了生产后，同年 11 月，它又在盟军的大规模空袭中被毁坏。

德国学者的第二个失误在于他们认为，新的超级武器——原子弹，就是热中子反应堆或与其相类似的某种装置，却没有考虑到采用美国人那样的原子弹设计：利用高浓铀和快中子。他们一直以为，必须将整个反应堆作为原子弹来投掷。

那么反应堆和原子弹到底有什么区别呢？

原子弹是一种空军使用的炸弹。它的爆炸机理是利用重原子核的裂变。就外形、尺寸和重量来说，原子弹和空军所用的普通炸弹没有什么区别。它由装药、引爆装置和金属外壳组成。

原子弹的装药是高浓度的铀—235 或钚—239，其总量超过临界质量。它们全都放在一个反射层内。在爆炸前，原子炸药分隔成几个部分，每部分质量都小于临界值。

在给定的时刻，在普通炸药爆炸力的推动下，原子装药的各部分聚集到一起。由于超过临界质量，刹那间引起链式核反应而发生爆炸。从链式反应

开始到发生核爆炸时间极短，以百万分之一秒计算。因此原子装药各部分的相互聚集是在一瞬间发生的。略有差错就可能只有极少量的裂变物质参加反应，原子弹就发挥不出它应有的威力。

炸弹的外壳用高强度和难熔的物质制成，这种外壳在核反应的初期可以减少装药的飞散，从而提高它的利用率，增加爆炸的威力。

反应堆所用的材料，以及它的设计和运行，和原子弹有很大的差别。动力反应堆一般都采用低浓度的二氧化铀作燃料。它分散地布置在一个较大的容器内，与非裂变燃料、慢化剂、冷却剂，以及各种惰性的结构材料交织在一起。这里的中子要比原子弹内的中子寿命长得多，因此不具备核武器的那种能量在刹那间释放的特征。由于没有引爆装置，即使反应堆达到瞬发临界而使功率猛增，也会由于材料的膨胀和变形而使堆芯很快解体，核反应便骤然终止，只有少量铀核来得及发生裂变。这不是核爆炸，只不过是一般的热爆炸而已。

50年代中期，美国在一座建在荒原上的热中子反应堆上进行过功率突升试验。他们在0.2秒的时间内，把一根控制棒从反应堆中弹出来，相当于向堆芯引入4%的反应性。这远远超过了瞬发临界的条件。反应堆果然发生了爆炸，但堆芯同时变形，限制了功率的上升。爆炸的结果只是把各种碎片，包括几乎所有的核燃料，散布到反应堆周围110米半径的范围内，从效果上来看，这次爆炸和中等数量化学物质所发生的爆炸相差无几。这个试验证实，热中子反应堆不可能发生类似原子弹那样的核爆炸。

## 二、荒谬的“中国迸发症”

反应堆工作时，要依靠冷却剂不断地从堆芯导出裂变所产生的热量。如果输送冷却剂的主要管道发生破裂，会造成什么结果呢？首先，毫无疑问，在压力下流动着的冷却剂会迅速从破口处大量往外涌出，要不了多久，堆芯就会裸露出液面，发生失去冷却剂事故。对压水堆和沸水堆来说，这又称为失水事故。

当发生大的失水事故时，反应堆会由中子得不到水的慢化而自动中止链式裂变反应，但堆芯中积累的大量裂变产物，将继续放出衰变热，热量释放的速率，大约相当于正常运行时的7%。停堆后15分钟时，衰变热的强度降到2%。一天以后大约降到0.5%左右，如果在这个过程中堆芯得不到冷却，燃料元件的温度就会上升。

首先是堆芯的金属与水蒸汽发生氧化反应，放出氢气和额外的能量。当堆芯温度上升到2800℃时，燃料和氧化后的金属都开始融化。融化的堆芯在反应堆容器内成为一种白热化的黏性物质。它会在几小时内熔透反应堆容器而掉到厂房的地板上。再穿过建筑物的钢板和混凝土沉入地下。

有些美国人认为，熔融的那团放射性物质将在地球引力的作用下，一边发热，一边钻进地壳，朝着中国的方向下沉。有些核动力专家开玩笑地说，它会熔穿地球而来到中国，因此，把这种堆芯融化事故风趣地称为“中国迸发症”。这本来是一种诙谐的说法，没想到竟有影片公司以此为主题拍了一部电影，于是“中国迸发症”这一名词就广为流传起来。然而这种说法不仅在物理学上是荒谬的，即使在地理学上也是不正确的。因为在地球上，与美国遥遥相对的并不是中国，而是印度洋。

实际情况是这样的：当堆芯熔化时，熔浆中的挥发性裂变产物（如碘—131、氪—85、氙—133等）将会逸入大气，如果不加约束，有可能随风飘流到居民中间，造成严重的辐照事故。非挥发性的裂变产物，随着熔浆沉入地下，但熔化的堆芯不会一直沉降下去。开始时，滚烫的熔浆由于不断地发出衰变热，熔化着越来越多的砂土和岩石，为自己的下沉开辟道路。然而到了一定程度，衰变热逐渐减少，而熔化体的表面积却越来越大，下沉过程就逐渐被抑制。以后，它开始凝固，并逐渐降温，成为埋在地下的一团固体的放射性物质。然而，即使埋在地下，放射性物质仍可通过各种渠道（如地下水等）进入人类生活的环境，引起严重的放射性污染。

### 三、三道防线和四道屏障

为了防止核电站发生严重事故，核动力专家们采取了“纵深防御”的策略，设置了“三道防线”。

第一道防线是为保证核电站正常运行而设置的各种精巧的自动控制系统，它们监测并调整核电站运行中的各种参数，如冷却剂的液位、温度、压力，反应堆的功率等等。当这些重要参数发生偏离时，自动控制系统就及时对它们进行纠正。

第二道防线是一系列的安全保护措施。当参数的偏离超过允许值时，各种安全保护系统就开始运行，例如及时自动紧急停堆，向堆芯注入应急冷却水等。

为了对付失水事故，堆芯的应急冷却系统又分成好几部分。在压水堆核电站中，它由三部分组成。首先是一个高压注射系统，用来对付小的泄漏。发生小失水事故时，它就向堆内注入高压水。破口较大时，则要依靠安全注射箱系统。它由几个装有硼水的大水罐组成。水罐上部充有14~45大气压（1大气压相当于101百帕）的氮气。如果失水事故使反应堆压力降到安全注射箱的压力以下，硼水就会在氮气压力作用下顶开阀门，迅速地自动进入反应堆去冷却堆芯。还有一个低压注射系统，在安全注射箱将水排完以后，自动投入运行，将另一水箱中的上千吨硼水连续地送入堆芯，将堆芯淹没。采用硼水来冷却堆芯，是因为硼能大量地吸收中子，可确保堆芯处于亚临界状态。

这些系统都有多重的设备，并由好几个电源供电，以提高保护功能的可靠性。

第三道防线是，预先制订好周密的事管理规程，一旦发生事故，就可利用核电站内部的潜在能力，或增加一些临时性应急系统，缓解事故的后果，并防止放射性物质污染周围环境，给居民带来危害。

核电站中最主要的放射性物质，是运行过程中不断产生的裂变碎片。在现代大型核电站中，其数量可达几十亿居里。为了防止它们外逸，在压水堆核电站中建立了“四道屏障”。

第一道屏障是核燃料本身。核燃料是经过高温烧结而成的二氧化铀芯块，这种陶瓷体的结构非常致密。它的晶格能截留住98%以上的裂变产物。

第二道屏障是燃料包壳，如装燃料芯块的锆合金密封管。锆管经过严格的考验，能长期在冷却剂内传输很大的热量而不出现泄漏，从而把扩散出芯块的2%的裂变产物（主要是气体裂变产物）保留在包壳内部。燃料元件在反应堆内通常要工作3年左右，在这段时间里，如果包壳发生哪怕细如发丝

的裂纹，就有一些放射性会进入冷却剂。这时，要依靠第三道屏障来阻止放射性物质的外流。

第三道屏障是由包容反应堆堆芯的钢制容器及其相连的管道系统组成的。由于压水堆的冷却剂在 150 大气压的高压下工作，钢制容器的壁厚往往超过 200 毫米。这道铜墙铁壁保证把放射性杂质限于反应堆装置的内部，并通过内部的净化系统不停地从冷却剂中去除这些杂质。

防止放射性外逃的最后一道屏障是安全壳系统。它包括反应堆厂房（即安全壳本身）和在事故发生时使厂房与外界自动隔绝的所有措施。安全壳是一个极其坚固的建筑物，一般由内衬钢板的钢筋混凝土制造。它能抵抗地震、洪水、风暴的袭击，也能承受由于失水事故而造成的内部高温高压，并能将失水事故产生的蒸汽凝结下来。当厂房内出现失水事故信号或高放射性报警时，安全壳系统就关闭掉所有可能使放射性物质泄漏的通路，从而保证居民生命财产的安全。

全世界核电站至今已积累了约 6000 堆年的运行记录。纵深防御的各道防线和屏障发挥了重大的作用。

然而，核电站也曾发生过两次重大事故。这两次事故的原因都与人为的过失有着密切的关系。

#### 四、震惊世界的三里岛事故

1979 年 3 月 28 日，星期三，凌晨 4 时零 36 秒，美国宾夕法尼亚州，离首府哈里斯堡东南 16 公里的萨斯奎哈纳河中，三里岛核电站二号反应堆的几台水泵停止了工作。在此后的几分钟、几小时、几天中，由于人为错误、设计缺陷、设备失效等一系列事件，最后堆芯因两次失去冷却水而烧毁。一部分放射性碘和稀有气体从电站中逸出，排入环境。这次事故直接损失达 10 亿美元，如果把间接损失计算在内，估计要超过 20 亿美元。事故是严重的，也是不幸的，然而没有给居民带来危害。下面让我们来看看那次究竟发生了什么事。

三里岛核电站是压水堆型核电站。这次事故是从一些微小的诱因开始的。首先是在控制和仪表用的压缩空气管线中出现了水分。它使凝结水—给水管线上的几个气动阀门自动关闭。凝结水—给水管线是把在汽轮机内作功以后的蒸汽冷凝而成的凝结水，送回到蒸汽发生器的一条重要管线。由于吸不上水，凝结水泵、主给水泵就纷纷跳闸，使蒸汽发生器得不到正常的供水，汽轮机便自动紧急停机。

事故发生后 1 秒钟，三台备用的应急给水泵自动启动。可惜，由于人为的错误，泵出口管线上的阀门在检修后没有放在开启的位置，应急给水无法到达蒸汽发生器。运行人员到事故发生后第 8 分钟才改正了这个错误。由于蒸汽发生器不供汽、不进水，使堆芯发出的热量不能畅快地排向二回路。事故后 3 秒钟，反应堆系统的压力上升，反应堆由于系统高压而紧急停堆。

系统高压使一电磁泄压阀向泄压箱排放冷却剂。按规定，电磁阀在系统压力下降后应重新关闭。然而它被卡在开启位置上。运行人员没能及时发现这一情况，因此反应堆冷却剂继续向泄压箱排放。事故后 15 分钟，冷却剂开始从泄压箱流出，进入安全壳的地坑，这实质上就是失水事故的开始，这样的失水过程一直延续了 2 小时 24 分钟。

由于冷却剂不断流失，反应堆回路的压力逐渐下降，高压注射系统自动运行，向反应堆系统注水。运行人员把它改为手动控制。4分38秒，由于反应堆系统出现高液位报警，运行人员手动减少了注射流量。这是一次重大的操作失误。运行人员没有意识到，这一高液位是由于系统在低压下出现了蒸汽而造成的虚假液位。当时，电磁泄压阀正处于开启状态，减少注射流量的结果使反应堆系统中的冷却剂入不敷出，系统在低压下出现了蒸汽。直到事故后3小时20分钟，运行人员才恢复了全流量的高压注射。

事故后头73分钟，四台主泵都在运行。主泵的功用是使反应堆冷却剂在堆芯和蒸汽发生器之间循环流动，带出堆芯的热量。然而由于失水和降压，系统中的蒸汽份额不断增加，实际上由主泵进行循环的是汽水混合物，它使主泵及其相连的管道发生强烈的振动。

这时蒸汽发生器已获得应急给水，如果主泵能坚持运行，汽水混合物完全可以保证堆芯的冷却。这时只要关掉电磁泄压阀上游的切断阀，或用高压注射泵提高反应堆系统的压力，热量就会不断地从堆芯转移给蒸汽发生器，反应堆系统中的蒸汽就会逐渐消失，一切也就化险为夷。

然而，在73分钟时，由于担心主泵及其相连管道发生损坏，运行人员停掉了环路B中的两台主泵，在100分钟时又停掉了环路A中的两台主泵，使环路B、A中的汽、水相继发生分离。这时在反应堆容器的上部出现了蒸汽垫，一部分堆芯失去了水的覆盖。这是一件特别危急的情况，核电站中价值最高的燃料元件，眼看着在自己产生的热量的作用下，渐渐自焚成一堆残渣。这个状态一直持续了8个小时，堆芯上部受到了严重的损害。事故后3年，用电视摄像机观察损坏的堆芯，发现那里出现了1.5米的空腔，其下面则是36厘米厚的碎渣层。

当三里岛核电站的运行人员全神贯注地应付种种危情的时候，在安全壳地坑中悄悄地开始积累起越来越多的冷却剂。起初这些冷却剂的放射性并不高，然而当燃料元件的锆管破损以后，放射性就大大地加强了。三里岛核电站没有为安全壳地坑设置自动隔离措施。当地坑水位升高时，地坑泵自动将坑内的水送到安全壳外的贮槽等待处理。贮槽很快满溢了，水流到地板上，一部分裂变产生的放射性气体被通风系统排出厂外。

在高温下，燃料元件中的锆合金与水（或水蒸汽）要发生化学反应，形成氢和氧化锆。根据计算，每千克锆氧化后大约生成0.5标准立方米的氢气。三里岛二号反应堆内的总锆量为24000千克，估计有30~50%参加了锆水反应，因此产生的氢气量是相当可观的。人们担心会发生氢气爆炸。

发生事故的当天下午13时50分，电气触点打出的火花点燃了氢气，使安全壳厂房内的温度上升了22℃，压力达到1.96大气压。这次局部的爆燃没有对安全壳的完整性造成任何威胁，因为安全壳，作为防止放射性外泄的第四道屏障，是按照4.2个大气压设计的，经受住了考验。

出于对自身健康和财产的担心，电站附近的居民纷纷向银行提款，驾着汽车远走他乡。估计从3月31日到4月2日，一共撤走了12万人。直到4月6日险象全部解除后，他们才开始陆续返回家园。

三里岛事故使居民们饱受惊恐，曾一度引起各界人士对核电站安全性的怀疑。但是，当人们惊魂稍定，仔细考察事故的后果时，不得不承认，核电站的安全设计是十分有效的。没有人受伤或死亡。堆芯的应急冷却系统在事故发生时能够有效迅速地自动发挥作用。尽管堆芯上部断续断续地裸露了8

个小时，遭到严重损坏，但安全壳作为最后一道强有力的屏障，使绝大部分放射性仍保留在核电站的内部，事故造成的放射性释放对居民健康的影响是微不足道的。

## 五、“世界的辐射首都”

美国三里岛核电站的事故带来了重大经济损失，而在前苏联的切尔诺贝利核电站于 1986 年 4 月 26 日发生的灾难，则留下了血的教训。

切尔诺贝利核电站位于乌克兰首都基辅以北 130 公里处，距切尔诺贝利城约 18 公里。电站有 4 座反应堆。它的 4 号堆是 1983 年才投入运行的，这是一座百万千瓦级的压力管式石墨水冷反应堆。这种反应堆有一个巨大的石墨堆芯，直径 14 米，高 25 米，重达 1900 多吨。堆芯上开有垂直的孔道，插入 1693 根压力管。水经过压力管带出堆芯的热量，并发生沸腾而产生蒸汽。高温高压的核蒸汽，直接送往两台 50 万千瓦的汽轮发电机组。在反应堆的顶上，有一套专用的换料机构，能在电站带功率运行的情况下更换核燃料。

切尔诺贝利核电站与压水堆电站不同，它没有包容整个反应堆系统的安全壳，而是采用一种舱室系统。大部分有冷却剂流动的管系，都封在一系列牢固的隔舱内。当管系发生破裂时，破口所在的隔舱就会充满汽水。这些隔舱都和反应堆下面的一个水池相连，当蒸汽通入水池时，它就凝结并被截留下来，不会向周围环境排放，因而也就阻止了放射性的外泄。但就反应堆本身来说，它的顶部却没有包容在舱室内，尤其是堆芯上面各换料孔道上的盖子，它们的上面只是一般的厂房建筑。

事故发生在一次正常的计划停堆过程中，当时人们正试图在汽轮发电机上进行一个试验。

事后发现，试验计划中有不少地方严重违反了基本运行规程。

石墨慢化堆与沸水堆不同，当堆芯内出现气泡时，它对反应性会产生正的空泡效应。反应堆在高功率运行时，这个正效应被其他的负效应（如燃料温度效应）所抵消，因此反应堆运行是自稳的。但当功率低于 20% 时，总的效应就变成正的，这时就很难用手动控制的方法使冷却剂的流量和冷却条件稳定下来。

试验开始时，操作人员让反应堆在低功率下运行，并违反规定，从堆芯抽出了大部分中子吸收棒。这种吸收棒一共有 211 根，主要用来调节反应堆的功率，控制堆芯各处功率的空间分布，必要时可使所有吸收棒立即自动掉入堆芯，进行紧急停堆。

为了使试验免受干扰，试验过程中还人为地关闭了自己紧急停堆系统和堆芯应急冷却系统。这样一来，反应堆便在一种没有足够保护的不稳定区域内运行。

谁也无法避免各种随机出现的微小扰动。在子夜刚过不久的 1 时 23 分，4 号反应堆堆芯内的蒸汽份额有所增加，引入了正的反应性。然而原来应该启动的自动紧急停堆系统被锁闭了。操作人员发现功率有迅速增长的苗头，试图手动停止链式反应，可是由于几乎所有吸收棒都被抽出堆芯，无法快速停堆。功率的上升促进气泡的形成，气泡增多使反应性继续增加，终于超过了瞬发临界状态。

根据专家们的计算，在 4 秒钟内，功率猛增了 100 倍。释放的能量

使一部分燃料突然破裂，成为碎片。细小炽热的燃料颗粒，可能还包括气化的燃料，造成了一次蒸汽爆炸。这第一次爆炸，掀掉了1000吨重的反应堆盖板，把输送冷却剂的管道统统切断。2~3秒钟以后，又听到第二次爆炸，从已损坏的反应堆厂房中，喷出炽热的碎片。反应堆外壳毁坏后，空气与石墨砌体相接触，使石墨熊熊燃烧起来。火灾使形势更趋复杂，更多的放射性物质升到大气层中，一部分燃烧的石墨和燃料，喷到附近各建筑的屋顶上。大量的放射性物质，以气体或尘粒的方式被风刮走，广泛地弥散开来，遍及欧洲各国，但大部分沉降在前苏联境内。

前苏联的应急部队和当地的消防部门立即作出响应，展开了灭火工作，因为大火一度威胁到了3号机组。4月26日凌晨5时，事故发生后3小时30分，大火被扑灭。3号机组没有受损，安全地停了下来。4月27日凌晨，1号和2号机组也相继停运。

由于堆芯发出剩余衰变热，4号堆继续喷出大量的放射性裂变产物。应急部队在反应堆上面投掷了大量的硼砂、石灰岩、沙子、黏土和铅块，以制止裂变产物的释放。开始时，随着投掷材料的增多，释放的裂变产物反而增多了。因为堆芯由于被隔离而重新升温。一直到事故后的第9天，产生的热量开始少于散失的热量，被闷在里面的石墨开始冷却，放射性的释放才逐渐停止。

根据专家们的估计，这次事故中，所有放射性的裂变气体100%进入了大气，其他放射性核素的释放量约占堆芯总量的3~4%，其中10~20%为碘-131和铯-137。碘-131会影响到食物链和呼吸道，但寿命很短，它的半衰期内有8天。铯-137被人体摄入后，会沉积在软组织内，半衰期为30年，要通过新陈代谢才能从体内排出。

救灾中有300人受到伤害而住进医院，其中203人得了急性的辐照综合症。31名电站运行人员和应急队伍成员由于辐照严重而死亡。在政府的组织下，13500居民被从污染地区疏散开，耗资近百亿卢布。

10年多过去了。今天，在当年的事故现场，有一堆硕大的钢筋混凝土覆盖着毁坏了的反应堆，人们称它为石棺材。这里埋葬着700千克钚-239，81千克铯-137，43千克锶-90。熔融的核燃料曾一度凝结成为固体的放射性岩石。然而，在温度和辐射的影响下，它现在正在逐渐变脆，变软，并成为灰尘。石棺并不密闭，有不少裂隙。有一个7000多人组成的机构正在现场开展着放射性生物学的研究工作。

虽然事故的严重后果没有当时人们所担心的那么可怕，但留下的教训是深刻的。这次事故的直接原因，是核电站运行人员严重违反了六项反应堆运行操作规程。因此，核电站的运行管理是极为重要的。

切尔诺贝利的事故，仍然动摇不了核能在能源需求中的重要地位。在前苏联的领土上，现在有46座动力堆在运行。25座是压水堆，21座是石墨水冷堆，其中15座是和切尔诺贝利4号堆一模一样的大功率石墨水冷沸水堆。

## 六、小小的风险

人类从生活常识和工作经验中早就理解，要达到任何预定的目标，都要冒一些风险。就拿上街寄一封平安家信来说，也要注意来往奔驰的车辆，“绝对安全”的概念是没有的。在核技术领域内也是一样，三里岛和切尔诺贝利

的重大事故说明，核电站也会带来一些风险，需要争取的是以尽量小的风险去获取大的利益。

在权衡事物的利害得失时，风险是一个比较全面的概念。它不仅考虑事件所造成的后果（如财产损失、人员伤亡等），而且还包括了事件发生的概率。用公式表示可以写成：

$$\text{风险} = \text{后果} \times \text{概率}$$

后果严重、概率极小的事件，或经常发生但后果轻微的事故，都不产生大的风险，也不对人类构成严重的威胁。

核电站究竟给人类带来了多大风险呢？虽然发生了两次重大的事故和若干次较小的事故，但动力反应堆的运行史尚不很长，还不足以提供有说服力的统计数据。于是，专家们便使用概率风险分析的方法，来研究核电站的风险与安全问题。

这种方法的基本原理是，在全面了解核电站有关系统和设备的基础上，结合推理、归纳，找出所有可能向外界释放放射性物质的事故序列。由于核电站是由各种系统（流体系统、电气系统、信号保护系统等）组成的，而系统又是由各种部件（泵、阀、容器、管道、开关、导线等）组成的，因此，可以根据部件和系统的失效概率，来推算出事故发生的概率，再乘上这种事故所带来的后果，就得到风险值。把各种事故带来的风险值加在一起，就是核电站的总风险。这种方法的优越之处还在于，可以把人的因素也定时地考虑进去，而人的因素就像在这两次重大事故中所看到的那样，也是十分重要的。

专家们经过两年多的探索，得出结论：核电站给社会带来的风险是很小的，要比非核事故的风险小得多，当建成 100 个核电站时，假定电站周围 30 千米半径内住有 1500 万人口，那末因辐射事故而承担的个人风险也只有  $3 \times 10^{-9}$  次/年。它不到非核事故死亡风险的万分之一。因此，核电站应该是十分安全的。

研究中对造成风险的各种原因进行分类归并后，得出了以下结论：1. 核电站的主要风险来自燃料熔化事故；2. 小的失水加上多重设备故障，最有可能导致燃料的熔化；3. 人为失误常常加重事故造成的后果。

这些结论发表在三里岛事故发生前 4 年，也就是 1975 年。事实证明，这个理论很有预见性。

## 第五章 放射性管理和辐射防护

### 一、两种“燃料”的对比

从数量上看，核电站可算作是世界上规模最大的放射性生产工厂。在反应堆运行过程中不断产生的裂变碎片，是核电站最主要的放射性来源。各种材料在堆芯辐射照场内吸收中子而活化，也给核电站带来额外的放射性，加上核燃料本身由于俘获中子而形成的超铀元素，以及衰变过程中产生的各种子核素，使反应堆实质上成为地球上放射性最集中的地方。

如果对原子武器来说，裂变碎片的放射性多多少少还有些军事价值的话，那么对核动力来说，生产出这么多的放射性物质，则会危害居民。所以在核电站设计中，总是千方百计地把它们禁锢起来，置于严格的监测之下。

绝大部分放射性物质，将随着烧过的燃料一起运走，少量将包容在各种核废物内进行妥善处理，决不允许它们给周围环境带来任何影响。

为了做到这一点，除了前面的三道防线和四道屏障以外，核电站还设置了各种辅助系统，经常性地清除反应堆冷

例如用过滤器去除冷却剂中的颗粒状杂质，用离子交换树脂或其他吸附剂吸收离子状的核素，用蒸发浓缩的办法去掉冷却剂中的非挥发性杂质成分。用这些办法可把放射性核素集聚起来，然后作为固体放射性废物包装运走，使反应堆冷却剂始终保持高度纯净。对可能漏入冷却剂中的少量裂变气体，则采用喷淋除气的方法将它们分离出来，然后收集在废气罐内，贮存衰变，经过 60~100 天，占废气份额 99.9% 的短寿命放射性核素，都会变成稳定同位素。

安全壳厂房与外界的空气交换也受到严格的监测，空气要通过过滤吸附装置以后，才允许被排到安全壳外。因此，随着核电站的废液和废气排入环境的放射性物质，实质上是微乎其微的。

核电站雨后春笋般地在世界各国出现，代替了大量的火电站。作为对比，现在让我们看一看火电站对环境有什么影响。

以一座 100 万千瓦的火电站为例。它每年要消耗 250 万吨标准煤。平均每天要有一艘万吨轮船或 120 节火车车厢来运送这些燃料。这些煤在火电厂的锅炉内燃料以后，留下 25 万吨灰渣，其余的 90% 都通过烟囱而排入大气之中，给空气带来的污染，简直可以和火山喷发相比拟。

燃料产物中对环境影响最大的是烟尘和二氧化硫。污染的空气可以最直接、最迅速地影响人的健康。当长期吸入不洁的空气时，烟尘中一些不大不小的颗粒会沉积在肺泡里，引起慢性支气管炎、支气管哮喘、肺气肿，甚至肺癌。二氧化硫遇到水分时，会形成硫酸的雾滴，刺激眼结膜和呼吸道，引起咳嗽、喉痛、呼吸困难等一系列症状。1952 年冬天，英国伦敦出现的著名的烟雾事件，就致使 3000 多人死亡。

此外，火电站还排出许多对人体有害的金属，如汞、镉、铍、铅等。它们大部分随着炉渣排入灰场，以后因风化侵蚀而进入周围环境。少部分则随着烟气直接飘散到各处。这些重金属可通过食物进入人体，引起慢性中毒。

除了烟尘、酸雾、有害金属以外，还需要指出一个出乎人们意料的事件：火电站排往露天灰场的 25 万吨灰渣中，还含有相当多的放射性核素。况且，它们不像核电站的固体废物那样，受到严密的监测和隔离，而是与环境直接相通。计算表明，同样功率的火电站带给环境的放射性数量，竟为核电站的 10000 倍！

这里有一个实例。若干年以前，美国密执安大学有一座小型的试验反应堆投入使用。有一天，当反应堆正在运行时，发现其附近的放射性监测仪器指示出很高的辐射水平。开始时，研究人员担心这是反应堆中的燃料元件出现了泄漏。然而仔细检查的结果表明，监测到的放射性并非来自裂变产物，而来自镭的衰变产物。这种产物是不可能从反应堆中释放出来的。有一位工程师偶然地向窗外望了一眼，发现一二千米外密执安大学自备火电站的烟囱正在冒出滚滚浓烟。经过进一步的检查，他的猜测得到了证实，正是火电站烟囱的排出物，给他们带来了麻烦。

由此可见，核电站在生态环境方面的优越性是十分明显的。一个 100 万千瓦的核电站，每年只需要 30 吨核燃料，而且丝毫不消耗空气中宝贵的氧

气。“燃烧”时它没有烟，没有灰，也不排出任何能导致疾病的有害物质。能够冲破重重屏障排向环境的放射性，真是极少极少的。因此，核电现在被越来越多的人誉为“干净的能源”。

读到这儿，大家一定要问，核电站产生的那么多放射性物质，最后究竟到哪里去了呢？那些看不见的辐射，对经常和放射性物质打交道的人有没有影响？下面要讲的就是核电站的放射性管理和辐射防护问题。

## 二、寻找最终的归宿

核燃料在反应堆内“燃烧”时，可裂变核素渐渐减少，裂变产物不断增多，其中有好几种核素会强烈地吸收中子。因此，到了一定程度，“核火焰”会逐渐熄灭。只有用新的核燃料组件来替换用过的燃料组件，才能使反应堆继续进行工作。

用过的核燃料组件与烧过的煤块有很大的不同。煤块烧过后，绝大部分可以燃烧的碳元素已气化变成二氧化碳。而用过的核燃料组件中，仍保存着大部分裂变物质。按其成分来说，96%是没有“烧”过的铀，1%是铀—238吸收中子而形成的钚，另外3%则是铀—238吸收中子而形成的锕系元素，以及铀—235裂变而产生的各种放射性或非放射性核素。

刚替换下来的燃料组件放射性很强，一般都要让它在核电站内贮存半年到一年，使短寿命的核素有相当大一部分衰变掉。在这段时间里，操作人员不能直接搬运这些组件，而必须在足够的辐射防护条件下进行远距离操作。在压水堆核电站中，这种操作是浸在水下进行的，水层有足够的厚度，可以保护操作人员免受辐射的损害。

用过的燃料组件经过半年以上的衰变，可放在装有屏蔽的车上转移到厂外的贮存地点或专门的处理工厂。在处理工厂内，通过一套遥控设备，从燃料组件中回收铀和钚，而留下一一种含有大量高放射性核素的废液，叫高放废液。

高放废液有不少有价值的核素，但数量超过今天的需求，因此目前还只能把它们作为废物进行处理。

放射性废物的最终处置，是一件令人头痛的事情。先要设法尽量减小它的体积。对含有较多可燃成分的废物，可采用焚化的办法，使放射性核素残留在灰烬之中。对含放射性核素的溶液，则采用蒸发浓缩的办法，使体积比原来缩小几十倍甚至上百倍。体积缩减后的核废物，如果处于分散和可流动的状态，还要用各种办法将其固化，其目的是使放射性核素不再扩散。现在比较成熟的固化剂有水泥、脲醛、塑料、沥青等。当放射性废物浇铸在这些材料内时，就成为固化块。这样就可以比较方便地进行运输、贮存，直至深埋。对于高放射性的废物，则要采用更为严密的固化材料将其固化。现在研究出一种把放射性物质固化在玻璃内的新工艺，它可以确保核素得到长期的固定。

下一个问题是，这些固化块又该放在什么地方呢？它们是不是还需要有人照看？是否有办法一劳永逸地把它们最终处置掉呢？

通常采用的办法是把核废物埋藏。专家们还寻找到一种更加彻底的办法，就是把它们送往远离尘世的宇宙空间。这是十分昂贵的，因此只能用来处理少量会造成长期麻烦的放射性核素——锕系元素。

把核废物送到绕地球运转的轨道上是没有意义的，因为绕地轨道的长期稳定性得不到保证，一旦发生坠落，就会给地球人类带来灾难。把废物送到月球或其他行星上，以邻为壑，似乎并非上策。因此，最彻底的办法是把废物送出太阳系。然而这样做需要有十分强大的运载火箭，且费用极高。

空间处置的方案有好几种。专家们发现，较为理想的方案，是把废物送入以太阳为中心，以太阳到地球的平均距离的 0.85 倍为半径的日心轨道。这个轨道在地球与金星之间穿过。废物被送入轨道后就像一颗小行星似的，可在地球与金星之间绕太阳稳定地运转 100 万年，而所需的火箭发射功率则与将核废物送入较高的绕地轨道相差无几。

彻底消除放射性核素的另一个方法是使其嬗变。就是用各种粒子去轰击长寿命的放射性核素，使它们很快转变成危险较小的短寿命核素或可裂变核素。

为了使待处置的核素进行嬗变，首先要把它单独分离出来，放在带电粒子加速器、裂变反应堆或聚变反应堆中承受粒子或中子的照射。而用于嬗变处置的最好工具，是我们下一章中将要讲到的快中子堆或热核聚变反应堆。那儿中子“产量”高，有利于嬗变过程的进行。需要处置的核素可做成针状，插在反应堆内，经受中子的轰击。根据计算，锕系元素在快中子堆中放置 5~10 年，其中 90% 将嬗变成可裂变核素，然后发生裂变而消失。

裂变产物中，有些核素会强烈地吸收中子。因此，在进行嬗变辐照以前，还要把它们和锕系元素分开。这是一项比较艰巨的任务，因为它们都是一些尺寸大致相同的三价离子，有十分相似的化学性质。

核素的分离和提取，是空间处置和嬗变处置所必须解决共同课题，科学家们还得花一段时间来研究。

### 三、从一个壮烈的史实说起

1946 年 5 月间，有一批客人来到美国新墨西哥州的洛斯阿拉莫斯。他们是七位世界著名的物理学家，专程前来观看加拿大籍科学家路易斯·斯洛廷博士给他们表演原子弹的作用原理。

斯洛廷博士把由裂变物质制成的两个半球放在架子上，每个质量都小于临界值。斯洛廷操纵一套远距离控制装置，使两个半球逐渐接近。中子数量随着半球的移动而不断增加。根据计算，在两个半球相距 3 毫米处裂变过程就会达到临界点。如果它们再靠近一些，中子增殖系数就会大于 1。

突然，有一个半球滑下来了。防止发生链式反应的间隙开始闭合。刹那间，房间内出现了眩目的闪光，红色指示灯告诉大家，辐射强度已达到危险值。人们惶恐不安，胆战心惊，只有斯洛廷仍保持镇静。当时半球之间的相对位置还不足以引起爆炸。他立即冲出屏蔽墙，用手把两个半球掰开了。危险排除了，很多人的生命得到了挽救。与此同时，博士意识到自己受到了强烈的辐照，但当时却没有感觉。

九天后，这位为第一颗原子弹作临界试验的科学家，在医院里与世长辞了。这是一次强烈辐射引起的急性死亡事故。

动物试验表明，在遭受大剂量辐照时，首先出现急性效应，这时，躯体受害的严重程度与吸收的辐射剂量有关。开始时会引起白血球的降低，随着剂量的增加，会生产呕吐、脱发、腹泻、感染、出血以及各种并发症，直至

死亡。

除了急性损伤以外，辐射的有些效应要经过较长时间才表现出来。在第一次世界大战中，X射线设备作为一种诊断器械，曾广泛地用来检查战争中的伤员。然而在战争结束后的头几年，那些在炮火纷飞中救死扶伤的X射线设备操作人员身上，却开始出现各种恶性肿瘤。实验证实，这是由于经常性地受到辐射而产生的一种晚期效应。而当年X射线设备的设计，没有很好地考虑对辐射的防护。受到慢性辐射损伤后，会患白血病、恶性肿瘤、再生障碍性贫血、白内障、不育症，等等。

除了早期和晚期的躯体效应以外，辐射还能在下一代身上产生遗传效应，使他们出现畸形。慢性效应与遗传效应往往只在少数人身上发生，对个人来说具有偶然性，并不是每个人都会得癌症或产生遗传缺陷。而急性辐照损伤则只与吸收剂量有关，任何人只要遭到足够强烈的照射，就会出现症状。

核电站在运行过程中会产生大量的放射性核素。为了防止辐射对核电站工作人员及其附近居民造成伤害，国际辐射防护委员会和各国政府，对允许接受的剂量和辐射防护作了严格规定。

我们已经知道，穿透力最强的射线是 $\gamma$ 射线。在核电站中，人们广泛地利用各种屏蔽结构，如铅块、混凝土以及其他高密度的材料来防止 $\gamma$ 射线伤害工作人员。在核电站内放置放射性设备的房间之间，都有很厚的屏蔽墙，将它们互相隔开，保证运行人员在操作走廊上工作时安全无恙。每个房间都有一个笨重的铅制屏蔽门，运行人员要用足力气才能使它缓缓地开启。放射性设备室平时很少进入，必要时经过辐射防护人员的监测，采取措施后方能进入，在里面停留的时间也受到严格控制。

为了减少辐照剂量，核电站中还使用各种远距离操作或自动操作工具，如机械手，它能在屏蔽墙的内侧模仿墙外操作人员的动作，把放射性物质装入瓶中，盖上瓶盖等等。

除了 $\gamma$ 射线以外，反应堆运行中产生的放射性物质，还会放出 $\alpha$ 射线和 $\beta$ 射线。这些射线穿透力很弱，在体外照射不会对人体构成重大威胁。如果这些辐射源通过吞咽或呼吸进入人体内部，则会使人体组织受到内照射，造成局部损伤。因此，在核电站各厂房内不能吃食物。核电站内部还设有非常完善的通风系统，保证各厂房有充分洁净的空气供应。检修时，还让工作人员穿上特种材料制成的“气衣”，把人从头到脚都密封起来，由外部供应纯净的空气用于呼吸。

尽管我们的感觉器官不能察觉到放射性的存在，但可以通过比较方便的仪器对它进行监测。每个从事放射性操作的工作人员，都配备个人的剂量仪。在他们工作的环境里，还设有高度灵敏的探测器。每次离开放射性工作现场，他们都要进行淋浴，更换衣服，进行全身的放射性测定，防止把辐射物质带到生活区去。每个人还经常进行体检。当然，即使处在严密的防护之下，也总免不了会受到少量的辐射，沾上一星半点的放射性物质，那时又会产生什么结果呢？下面我们就来谈谈小剂量辐射对人体的影响问题。

#### 四、从保守到乐观

有一点已经非常清楚，小剂量的辐射不会引起躯体的任何早期症状。但对它带来的后期效应和遗传效应，目前却没有完全一致的看法，因为极准确

定症状与辐射的因果关系。在这方面，现在存在三种不同的观点：

第一种观点认为，剂量不管大小，一律有害。这种观点由于缺乏有力的证据而未得到广泛的支持。

第二种观点认为，大剂量有害，但在一定阈值（限额）以下的小剂量，则无害。

大量的医疗记录和多次的动物试验显示，如果有 100 万人，每人受到 0.01 希沃特的辐照剂量（希沃特是辐照剂量的单位），则在他们以后的生命过程中将有 125 人会因此而患恶性肿瘤，后代中有 80 个有缺陷个体，与原有的统计数字相比，只使癌症死亡率增高了 0.063%。后代中的有缺陷的个体数与总体平均的遗传缺陷数相差无几。这说明小剂量辐射不会损害人体健康。

日本对广岛和长崎的原子弹幸存者曾作过广泛和深入的调研，发现对低于 0.1 希沃特辐照剂量的受害者来说，很难找到吸收剂量与健康效应之间任何具有统计意义的重大联系。吸收剂量超过 1 希沃特的人，虽有明显的躯体损伤，但在他们的后代中，并没有察觉到额外的遗传效应。有一些幸存者的子女表现出遗传上的缺陷，但其概率并不大于整个日本人的平均值。

事实上，即使没有核电站，人类也一直在经受着小剂量的辐射。因为在我们的周围到处存在着少量的放射性。例如，天然钾元素中含有放射性核素钾—40，它的丰度为 0.0119%，体内的积存量约为 2.4 毫克。人通过食物每天摄入一点点钾—40，它们在血液中循环流动，不断地放出  $\gamma$  射线而衰变，使人人都成为一个微弱的天然放射源。对这种水平的放射性，我们早就适应，当然无需顾虑。

一些学者由此提出第三种观点，认为像天然辐射那样的小剂量照射，对生物不但无害，反而有益。它是生命进化过程中的必要因素，可以延长寿命，减低慢性病的死亡率，有利于繁殖后代。

他们认为，我们的地球实际上是从一个放射性较高的状态演化过来的。进化的过程赋予了人类各种感觉，提醒人类去发现并适应自然环境中可能遇到的各种危险。例如我们能看到火焰，感觉到它发出的热量，从而可以避免烧伤。但人的感觉却不能监测到辐射的存在，这是什么原因呢？道理很简单，因为没有必要。

现在人们时时刻刻担心放射性的危险，但生命却在放射性的包围中毫不在乎地照旧繁衍着。这说明我们已经适应了这种天然放射环境。由此看来辐照对细胞的少量破坏，很可能是生命所必要的，因为这能刺激遗传复制的机制。

这种假设并非异想天开。大家知道，某些毒物，如鸦片、吗啡等，当小剂量使用时，能使人兴奋，大剂量使用时却对人体有害。高浓度的栎树皮提取物能抑制霉菌的生长，而小剂量的使用则能促进霉菌的生长。当生物机体暴露在微量的或低水平的有害物质或不利因素中时，能激发出天然的生理性防御机制，有利于生物的健康和生存。我们接种的疫苗就是这样一种物质。它们使人产生出抗体，免受各种致病菌的暗算和杀伤。

为了弄清楚小剂量辐射的作用，科学家曾进行过一些动物辐照的对比试验：把刚生下的鲑鱼卵分成两组，其中一组用  $\gamma$  射线照射，另一组作为对比，然后进行孵化喂养。90 天以后，鲑鱼长到 5 厘米左右，分别做上记号，放入天然环境中。几年中，统计回来产卵的鲑鱼数量后发现，受过辐照的鲑鱼洄游回来的数量要多得多。进一步研究表明，小剂量照射能提高受伤动物的存

活率。

那么人对小剂量辐射会有什么反应呢？我国广东省阳江市的  $\gamma$  射线的强度，约为一般地区的 3 倍，居民全身受到的内外照射的年剂量，达到  $2.47 \times 10^{-3}$  希沃特。11 年中对 8 万人进行调查，结果发现该地区居民的癌症死亡明显低于一般地区。我国居民的恶性肿瘤死亡率平均为  $66.92 \times 10^{-5}$ ，而阳江市地区却只有  $41.19 \times 10^{-5}$ 。印度、巴西、英国等国家也对某些地区作过统计，给出了类似的结果。

介绍这些材料，并不是想告诉大家，可以对辐射采取漫不经心的态度，而只是希望减少一些不必要的顾虑。实际上，在日常生活中，彩色电视给我们的辐射剂量，每年大约为  $1 \times 10^{-6}$  希沃特；从上海坐飞机到北京，从宇宙射线中可得到  $1 \times 10^{-5}$  希沃特；每年的食物带来  $1 \times 10^{-4}$  希沃特；轻型混凝土房屋每年给居住者的辐照为  $1 \times 10^{-3}$  希沃特；而作一次胃肠道的透视检查，则为  $1 \times 10^{-2}$  希沃特。相比之下，核电站带给居民的剂量，不超过  $5 \times 10^{-6}$  希沃特，只是略为高于彩色电视而已。

## 第六章 核能的未来

### 一、越烧越多

现在广泛建造的核电站，只能利用铀资源的 1~2%。它给我们赢得了几十年珍贵的时间，去开发新能源。然而，我们的最终目标，是要寻求能持久解决能源问题的方案。很多国家目前都在积极研究一种新的堆型——快中子增殖堆。当它们能像压水堆那样得到推广时，世界能源的紧张局势就会有所改变。

什么叫做增殖堆呢？任何反应堆运行时，都能使堆芯内的一部分铀—238 或钍—232 转换为可裂变物质。堆内新产生的裂变物质和消耗掉的裂变物质之比称为转换比。压水堆的转换比只有 0.6 左右。而快中子堆的转换比却大于 1，即在每“烧”掉一个裂变原子的同时，会形成一个以上的新的裂变原子。因此，堆内的核燃料不是越“烧”越少，而是越“烧”越多。过了若干年，一个反应堆内积存的燃料，将可分别供两个反应堆使用。这就叫做核燃料的“增殖”。

核燃料的增殖有两条途径。一条是利用铀—238 产生钷—239，钷—239 制成燃料元件后在堆内裂变，又可使铀—238 发生转换。这种方式称为铀—钷循环。另一条途径是利用钍—232 产生铀—233。铀—233 燃料时，又使钍发生转换。这种方式称为钍—铀循环。当这两个燃料循环有朝一日真正运转起来时，人们拥有的能量储备就会扩大几十倍。

要实现燃料的增殖，利用快中子堆是一条有效的途径。这是什么原因呢？前面我们提到过，中子运动的速度增高时，一般地说，它与各种核素发生核反应的机会就要减少。但有个例外，即它被铀—238 俘获的机会却增加了。因为铀—238 有一种“共振吸收”的本领。依靠这个本领，它可以把很多中子俘获过来，使自己变成钷—239，达到增殖的目的。

为了保证中子不被慢化，快中子堆的设计有很多特点。首先，它没有慢化剂，堆芯的燃料元件排列得十分紧凑。其次，由于快中子使铀—235 发生裂变的本领不如热中子，必须提高堆芯燃料中铀—235 的浓度，或添加一部

分钚—239。第三，在堆芯的外围上贫铀（铀—235 的含量比天然铀还要少的称贫铀）或钍—232 组成增殖区，逮住从堆芯内逃出来的快中子。与热中子堆相比，快中子堆在更小的堆芯内产生大量的热能，所以要求冷却剂具有更好的导热性能。一般选用液态金属来导出堆芯的热量。

增殖最早是于 1946 年，在美国一座小试验堆上实现的。这是一座用钚作燃料、水银作冷却剂的反应堆。在这个基础上，美国又建造了试验增殖堆 EBR—1。它利用浓缩铀作燃料、铀—钾合金作冷却剂。这座反应堆在核电发展史上占有值得纪念的一页。因为它最早把核能转化成了电能。1951 年 2 月，它首次用裂变原子的能量带动一台小汽轮发电机，用 4 个灯泡发出的光线照亮了漆黑的爱达荷沙漠。

40 年来，快中子增殖堆在很多国家中经历了试验堆、原型堆和商业性示范堆的发展过程。目前，最成熟的是用液态钠作冷却剂的快中子增殖堆。依靠这种金属极为优异的传热性能，可使堆芯达到很高的功率密度，从而缩短核燃料倍增所需的时间。

钠的熔点为 97.8℃，沸点为 895℃。因此，可把冷却剂加热到 500℃ 以上，而不要求回路承受明显的压力。在这样高的温度下，可生产高温高压的蒸汽，使整个核电站的热效率提高到 40%。

一回路中的液态钠通过堆芯时，会感生出很强的放射性，而钠和水相遇又会发生猛烈的反应，生成氢氧化钠并放出氢气。为了杜绝放射性钠与水接触的可能性，从堆芯导出的热量要先转移到一个中间回路。中间回路也用钠作冷却剂，但它没有放射性。这种没有放射性的钠，将热量带到蒸汽发生器，通过传热产生蒸汽。在蒸汽发生器中，钠和水依靠传热管互相隔开，蒸汽发生器必须设计和制造得十分严密可靠，防止钠与水的接触。

快中子堆对反应性的变动会作出很快的响应，而控制装置则动作没这么快。因此，在设计中要使反应堆本身具有足够的自稳性能，即当燃料温度升高时，反应性应自动降低。

还有一个令人担心的问题：快中子堆为了强化冷却和便于燃料循环，堆芯中大量的裂变物质，并不是按反应性最大的方式配置的。因此，如果发生事故，使堆芯塌落，则燃料可能会往越临界的方向迁移，到达一种具有更大反应性的形态，从而引起大规模的能量释放。这种事情不可能在压水堆中发生。虽然目前有很多反应堆工程师认为，燃料实际上不大可能重新组合而达到这种超临界状态，但他们仍在进一步研究快中子堆的安全性。

世界各国曾先后建造过几十个快中子堆和试验装置，其中有几个昙花一现就报废了。美国建造过 7 个快中子堆，最后的一个示范性的快中子堆，功率 300 兆瓦，由于没有通过安全审批，最后建设计划被搁置。

快中子堆发展得比较好的是法国。它的“凤凰”快中子堆和“超凤凰”快中子堆，都采用一体化的池式结构。反应堆容器是一个很大的不锈钢池子，直径 22 米，高 10 米，壁厚为 35~50 毫米，堆顶是 3 米厚的钢和混凝土做成的盖板。在这个钢池子里，除了堆芯以外，还放入一回路钠泵、钠—钠热交换器，这就保证放射性钠不会离开反应堆容器。一回路钠由下而上经过核燃料，加热到 545℃，然后进入钠—钠热交换器。在反应堆容器外面，还包有一个同样厚度的钢容器。整个装置再装在 1 米厚的混凝土安全壳内，可以说是重重设防，保险又保险。在 1991 年世界核电站统计表中，可以找到 9 座快中子堆核电站，但实际在运行的只有 4 座，法国的“超凤凰”堆便是其

中之一。

快中子堆由于技术复杂，安全要求高，因此造价很高，它的投资约为压水堆核电站的 5 倍。

## 二、人造的微型太阳

要解决人类对能量的长期需求，最好的办法是发展可控热核反应。它是在极高的温度下，使轻原子核发生聚变而产生能量的一种方法。核聚变的原理早在 1933 年就被发现了，比裂变原理的发现整整早了 5 年。可是由于技术复杂，人类至今尚未建成聚变核电站。只能由不受控制的热核反应——氢弹来显示聚变过程惊人的威力。

核聚变实际上是宇宙中经常发生的一种能量转换过程。亿万颗恒星，包括我们的太阳在内，辐射的能量都是在氢核聚合成氦核时释放出来的。因此，有人把核聚变装置称作人造“微型太阳”。但核聚变这种自然界中轻而易举、天天发生的过程，却是科学技术上久攻不克的顽固堡垒。

聚变反应遇到的第一个问题是轻核都带有正电，因此会互相排斥。要发生聚合，必须使轻核以极高的速度运动，能克服静电斥力而相撞在一起。看起来这个问题不难，因为把带电粒子加速到很高的能量还是有办法的。如电视机的显像管，就能把电子加速到这样高的速度。利用粒子加速器也可使轻核加速到同样高的速度，用这种高速粒子去轰击轻元素的靶核，原则上就能产生聚变反应。然而实际上，这种做法效率很低，绝大部分入射粒子会反跳回来。散射的概率比聚变的概率高几百万倍。

另一种办法是把聚变燃料加热到极高的温度。这时，杂乱无章的热运动，会使一部分轻核达到足够高的速度，克服斥力而聚合到一起。在这样高的温度下，轻核发生电离而成为正离子，核外电子不再绕核运动，而能在空间自由飞翔。这时的物质既不是固态，也不是液态或气态。在这种状态下，物质的每个体积单元中，都含有相等数目的自由电子和正离子，因此称为等离子体。它是物质的第四种状态。

实际上，宇宙中极大部分物质都以等离子体状态存在。所有恒星，包括太阳在内，主要成分都是氢和氦的等离子体。在地球上，最普通的等离子体则是霓虹灯内的发光气体。

在太阳中产生等离子体，主要是依靠它本身巨大的质量和体积。根据测定，太阳的质量占整个太阳系的 99.8%，其中 73% 是氢，25% 是氦，2% 是碳、氮、氧等核素。它的平均密度为  $1410 \text{ 千克/米}^3$ ，比地球要小好几倍（地球的平均密度为  $5520 \text{ 千克/米}^3$ ）。表面温度为 5780K。然而，在强大的引力作用下，太阳中心的密度则为  $105 \text{ 千克/米}^3$ ，每立方厘米的质子数达到 1025，温度高达 1500 万度。

但是，即使在这样的条件下，太阳中实际上也只有极少数质子发生聚变反应。大部分质子等了几十亿年还没有轮上。说起来也许不信，太阳中每克物质所发出的热量，比人体在新陈代谢过程中发出的热量小 100 多倍，其数值只有  $5 \times 10^{-3} \text{ 卡/（克} \cdot \text{秒）}$ 。整个太阳所以能发出非常巨大的能量，只是因为它的总质量很大而已。

既然太阳中每克物质产生的能量比人体小 100 倍，它又怎能保持它的炽热状态呢？这时，因为单位时间发出的热量与太阳的体积成正比，而散走

的热量则与太阳的表面积成正比。因此体积越大，散热越慢，温度越高。在动物界，大象散热的速度就要比老鼠小 30 倍。如果它的新陈代谢和老鼠一样旺盛，就会被活活烤焦。

预计人类能够建造的热核装置，其尺寸要比太阳小得多，远远小于老鼠和大象的比例关系。因此，为了保证热核聚变的温度条件，能源释放热量的速率应比太阳大得多。现在，人类用一种比较粗暴的方式，来达到热核反应所需的高温。氢弹中的聚变过程，是依靠核裂变炸药来点燃的。聚变过程在极短的一瞬间完成，放出能摧毁一切的巨大能量。

要实现受控的聚变反应，则需采用另外一些方法，例如用强大的电流通过等离子体对它加热，或用激光等高度集中的能量使它升温。然而，要想使聚变释放的能量大于对等离子体进行加热所消耗的能量，却并非易事。因为轻核在几百万次碰撞中，才能有一次机会发生聚变反应。因此要达到目的，必须把炽热的等离子体约束一段时间，不马上散掉，而且等离子体内粒子的密度要很大，以增加碰撞的机会。约束时间  $T$  (秒) 和等离子体的密度  $n$  (粒子数/厘米<sup>3</sup>) 有关。密度大，约束时间可短一些。反之，约束时间就要加长。这个条件称为劳逊判据。氘—氘聚变，要求  $nT$  大于或等于  $10^{14}$  秒/厘米<sup>3</sup>，反应温度为 1 亿度；氘—氚聚变，要求  $nT$  大于或等于  $10^{16}$  秒/厘米<sup>3</sup>，反应温度为 5 亿度。

在太阳中，对等离子体进行约束是不成问题的。它依靠自己的引力，自然而然地做到了这一点。然而在地球上，这却是一项极其困难的任务。如果将我们呼吸的空气加热到等离子体的温度，它的压力将为 1000 万大气压。地球上没有一种容器能把它约束在一起。而且任何容器材料与等离子体相遇时，不是本身被气化，就是使等离子体立即冷却下来。

多年来，从事聚变研究的科技人员，一直把希望寄托在各式各样的“磁瓶”上。根据磁性流体力学的理论，带电粒子在磁场中将沿磁力线作螺旋运动，而不会横切磁力线离去。磁场越强，回旋半径越小。当磁场强度高达几万高斯，温度为几千万度时，带电粒子的回旋半径只有几毫米。由于等离子体也是一种带电的粒子流，因此可以利用这一原理对它进行约束。

目前，用磁来约束等离子体的最好办法，是利用一种叫做托卡马克的环形装置。1966 年，前苏联首先在这种装置上取得初步成果。

美国现有一台世界上规模最大的托卡马克装置在运行。这个装置在 1982 年成功地约束了首批等离子体，使聚变反应进行了 50 毫秒。等离子体温度达到 1.8 亿度。

我国在 1984 年 9 月启动了自己设计和研制的受控核聚变装置——中国环流器一号。8 年来，它完成重大实验 20 多个，获得研究成果 400 多项。最近 3 年，科研人员针对世界核聚变研究的前沿课题开展工作。在核聚变的三大要素，即等离子体的密度、温度和约束时间方面，都取得了新的突破性进展。人造的微型太阳即将冉冉升起。

### 三、地平线上的曙光

尽管在托卡马克装置上，物理学家们还要进行大量的研究和探索，动力工作者却已迫不及待地根据它的原理，对聚变核电站进行了概念性设计，并打算建在美国橡树岭实验室内。

在这个设计中，托卡马克反应堆包容在一个很厚的一次安全壳内，外面再罩上一个二次安全壳。与安全壳相邻的，则是汽轮发电机厂房。布局与裂变核电站十分相似。反应堆的环形燃烧室内，氘—氚等离子体在强大磁场的约束下进行热核反应。环形室外侧围有一圈由不锈钢小室构成的包覆层。小室内装满了液态锂或固态的氧化锂小球。这些材料用来吸收氘—氚反应产生的中子的能量，并利用这些中子使锂转化为氚。这些氚分离出来以后，又可送入环形室作为等离子体燃料使用。

反应堆采用半稳态燃烧方式。开始时用一个强大的变压器对环形室内的氘—氚气体放电，产生等离子体，并在环形室内产生电流，以后再点燃许多中性粒子束的注射枪。这些注射枪将能量很高的氘和氚作为燃料，注入等离子体，同时使等离子体的温度上升到热核点火温度。当热核聚变反应开始时，反应释放的  $\alpha$  粒子（氦核）会进一步加热燃料，使它达到设计的温度水平。在这个水平上，反应堆大约可运行 90 分钟。依靠不断地向等离子体注入氘和氚的冰冻小球来维持燃烧。限制燃烧周期的因素是变压器维持环形电流的能力，以及等离子燃料中杂质的积累。当燃烧周期快结束时，把一些杂质注入等离子体，使反应中止。然后，把反应室内的全部气体抽净，重新装入新鲜燃料，以备下一个燃烧周期使用。

锂垫吸收中子能量后，形成一个体积式热源。依靠二次冷却剂氦或钠，将热量引出锂垫，作为发电用的蒸汽动力循环的热源。电站生产的电能中，20%用来建立磁场，产生环形电流和注射中性粒子束，其余送入电网。这样，核聚变电站就可源源不断地送出大量的能量。

聚变堆输出同样多的功率时，产生的中子数大约为裂变堆的 4 倍。因此，聚变反应堆不仅是一个动力源，也是一个强大的中子源。不少动力工作者建议，把明天的聚变技术与今天的裂变技术结合起来。在聚变反应堆周围放上亚临界的裂变燃料垫，利用热核中子使燃料裂变，可以提高整个装置的功率。在聚变堆周围，放上可转换物质铀—238 和钍—232，就可使裂变燃料增殖。在其周围放上需要处置的长寿命放射性核素，如锶系元素，就可以使它们在很短的时间内嬗变成短寿命的或稳定的同位素。

与裂变动力堆相比较，聚变动力堆的安全性也十分优异。由于它每次只能燃烧反应室内的那些燃料，其总量不到 1 克，因此决不会出现能量的失控。

然而，要真正设计出一个聚变核电站，还要解决一系列重大的技术问题。最棘手的是反应室壁面上会出现大面积的辐照损伤，即“第一壁”问题。事情是这样的，可控聚变堆产生的中子通量，比快中子增殖堆几乎要高出 10 倍左右。在电站 30 年运行寿期内，第一壁材料中的每个原子，由于与快中子碰撞，要移位 500 次以上。这会使容器的材料显著地肿胀起来而变脆。其次要严格地防止氦的泄漏。聚变反应室内，等离子体本身的氦装量虽然小于 1 克，但电站内总的氦装量，包括锂垫和氦回收系统中的氦装量在内，可以高达 10 千克。由于氦极易以氦水的形式被生物机体所吸收，因此即使漏出一小部分，也是一次重大的放射性事故。

磁约束聚变堆还有一个严重缺陷：等离子体十分稀薄，燃料的功率密度只有  $1 \sim 10$  兆瓦/米<sup>3</sup>。与此对照，压水堆堆芯的功率密度为 100 兆瓦/米<sup>3</sup>，快中子增殖堆则为 400 兆瓦/米<sup>3</sup>。由于聚变堆不能像裂变堆那样，让冷却剂直接流过反应区，故只能在等离子体的外围设置非常复杂的结构，进行热量的收集。当反应区的功率密度很低时，其外围结构的尺寸就要增大，因而大

大提高了电站的建造成本。

为了绕过这些困难。现在还在研究另一种实现劳逊条件的方法，即利用惯性约束原理。这个方法的基本要点，就是用激光极其迅速地加热等离子体，使它达到点火温度而发生聚变。这时，燃料由于自己的惯性仍保持在一起，在没有来得及散开以前，就释放出足够多的能量而完成整个过程。实际上，氢弹中能量的释放，就是在惯性约束下进行的。

要使氢弹中的能量有控点、一点一点地释放，可以设想把氢弹做得很小很小，使每次爆炸只有很少的燃料参加反应。例如，把氘和氚做成与针尖大小差不多的冰粒。每次爆炸的能量相当于几千克炸药。改变单位时间内爆炸的次数，就可控制聚变能释放的速率。然而，究竟用什么方法，才能将燃料极其迅速地加热到聚变温度呢？这里当然不能再依靠裂变的原子弹，因为它的临界体积太大，而要利用武器研究中发展起来的另一种新技术，这就是激光。

60年代初期，物理学家发现了激光现象。利用激光物质的特殊性能，可以获得一种高度单色的平行光束。经过聚焦，这一光束的能量可集中到一个非常小的点上，并在极短的瞬间，以迅雷不及掩耳之势，将能量释放出来。利用这样的激光，就有可能在100亿分之一秒（ $10^{-10}$ 秒）的时间内，在氘—氚靶丸解体以前，把它加热到热核点火温度。

然而，为了满足劳逊条件  $nT$  大于或等于  $10^{14}$  秒/厘米<sup>3</sup>，要求燃料中的粒子密度非常高。当  $T=10^{-10}$  秒时，粒子密度  $n$  必须大于  $10^{24}$  粒子数/厘米<sup>3</sup>。这个密度比固体密度还要大10倍左右。

如何才能做到这一点呢？唯一的办法是在点火以前，先把燃料狠狠地压缩一下。然而这里不能利用普通的机械压缩的方法，也不能用化学的爆炸压缩的方法。科学家们从激光本身找到了一条妙计。这就是利用很多束激光，在同一瞬间，从四面八方射向靶丸。在几个毫微秒的时间内，把靶丸表面加热到上亿度的高温。这时，燃料表面迅速蒸发、电离。消融沸腾的材料，以每秒上万公里的速度飞向周围的真空区。在喷离过程中，同时产生一个向心的反作用力，造成一个冲击波，把靶丸压缩到其密度比液态氢高出10000倍左右，其内部的压力达到  $10^{12}$  大气压。这样高的密度在天文学中也是不常见的，只有在高度密实的白矮星中才能找到。

靶丸在压缩时被加热到热核反应的温度。这时氘—氚聚变产生的高能粒子，被吸收在材料的内部，使其温度进一步升高，燃烧更加猛烈。只要经过  $10^{-12}$  秒，就可烧掉相当多的燃料。在这以后，释放的能量将靶丸炸开，于是反应中止。这样的微型热核爆炸每秒进行10~100次，释放的能量被周围的锂垫所吸收，转化成热能，就可产生蒸汽来驱动汽轮发电机，发出电能。

#### 四、奇妙的微观世界

在聚变反应中，转化成能量的那部分质量，至多不超过燃料质量的千分之一。有没有可能使更多的质量转化成能量呢？物理学家回答说：有，下面，让我们先漫游一下物理学中奇妙的微观世界。

几十年以前，在基本粒子物理学的辞汇中，出现了“夸克”这一术语。它是物理假说中的新粒子。

科学家用了2000年时间才搞清楚所有的物质都是由分子组成的。经过了

200年人们发现了原子。又过了20年才懂得原子是由各种基本粒子,即质子、中子和电子组成的。至此,门捷列夫周期表的意义才趋于明朗。当时大家以为找到了物质的源头,找到了原物质。然而,正当物理学家们额手相庆之际,出现了新的“麻烦”。

本世纪50年代初,物理试验工作者在强大加速器的协助下,开始发现越来越多的新粒子。起初大家简单地用字母来代表它们。为了避免混淆,这些新发现的粒子都称为“超子”,而对所有发生强相互作用(即发生核力作用)的粒子,包括介子、核子和超子,都给了一个共同的名称,叫“强子”。随着岁月的推移,强子的数目现在已超过200种,比门捷列夫周期表上的元素还要多。在这种五彩缤纷的粒子世界面前,人们终于意识到,粒子到了该和“基本”这一形容词分手的时候了。

理论研究发现,强子可以根据它们的质量、电荷、自旋等性质进行排列组合,还可按自己的基本性质分成若干小家庭和大家族。这时,大家自然而然地提出了一个问题:这种规律性究竟是如何产生的?就像门捷列夫建立元素周期表,使人们理解到原子的壳层结构那样,1963年,有两位理论物理学家不约而同地提出了存在“夸克”的假说。一位是美国的盖尔曼,另一位是澳大利亚的查维格。他们认为,夸克是比基本粒子更基本的“基本粒子”。当它们以不同方式组合时,就能形成所有的强子。开始时认为有3种夸克,后来增加到6种。它们是上夸克、下夸克、底夸克、顶夸克、奇异夸克和粲夸克。

用夸克假说去分析强子的构成,取得了很大的成功。许多年来,人们一直认为电荷是整数的,不是+1就是-1。然而夸克却与众不同,它具有分数电荷。有一种夸克的电荷是+2/3,还有一些是-1/3。利用它们可以组合成具有整数电荷的电子。举例来说,质子就是由两个电荷为+2/3的夸克和一个电荷为-1/3的夸克所组成的。

夸克假说在开始时受到猛烈的抨击。但夸克理论预言,存在着一种新的强子—— $\Lambda$ 子,这个超子很快就被找到了。夸克理论的预见性得到了证实,盖尔曼因此获得了1969年诺贝尔物理奖。

物理学家们开始投射于夸克的寻找工作。先是在海洋中找。那儿在几亿年中似乎应该积累起一些夸克。后来又在陨石和宇宙射线中找,结果却毫无所获!以后制成了越来越强大的加速器,寻找夸克的本领大大地增加了,但它仍然杳无踪影。在基本粒子现象中,处处表现出需要有夸克这样一个客体存在,但它却像幽灵似地飘荡在粒子的内部。

有人开始说,夸克只是一种方便的抽象。又有人说,到了2000年,夸克理论将被人们彻底忘掉。那时物理学家们对什么是夸克这个问题,将耸耸肩膀而无可奉告。

这时出现了另外一个假说,认为夸克原则上是不能发现的!核子和超子是由3个夸克构成的,介子是由2个夸克(夸克的反夸克)构成的。介子有些像磁棒。当把磁棒切割成两部分时,每一部分都将成为一根独立的磁棒,各具有自己的南磁极和北磁极。同样,如果把介子的各组成部分分开,就会得到新的夸克和反夸克,从原来的一个介子,变成了一对分子,夸克的独特之处就在于此。人类第一次发现了一些原则上无法在纯粹的孤立形态下进行观测的微观客体。

科学家们最后用间接手段证明了夸克的存在。最后一个夸克——顶夸克

是在 1984 年才证实的。经测定，它的质量竟为质子质量的 30 ~ 50 倍。

夸克使我们感兴趣的原因之一，是它有可能和未来的动力事业联系起来。前面已经讲到，每个质子由 3 个夸克组成，而每个夸克在质量上要比质子重几十倍！这正是微观世界的奇妙之处。在这里，大象可钻进老鼠的肚子里，在质量上“部分”可大于“整体”，因此“肥胖”的夸克也就装入了“瘦小”质子的内部！这样一来，又可使用爱因斯坦的质能相当定律了。如果 3 个自由夸克合成一个质子，它们质量的 95% 将会消失而转化成能量，那么它比热核反应所产生的能量还要大几千倍。简单的计算表明，用掉 1 克夸克所放出的能量，与燃烧 2500 吨石油相当！稍稍体会一下这个庞大的数字，大家一定会惊叹，能源事业的前景是多么的美妙！

虽然我们现在对夸克还了解得很少，然而我们有理由保留这个美好的希望。回想一下本世纪初，当时证明了 1 克镭完全衰变后所释放的热量比 1 克煤大 36 万倍，但是，它的半衰期很长，实际上，我们从罗马帝国覆灭的时代等起，一直等到今天，才获得了这些能量的一半。学者们干预衰变进程的努力多次都以失败而告终。当时也曾使部分专家感到沮丧。然而结果如何呢？我们真的不能利用这样的能量吗？显然不是。人类逐渐懂得，不应该等待原子核自己衰变，而要学会把它们击碎，于是核电站建成了。人们从微小的原子核中大规模地取得了所需的能量。

今天对夸克来说，情况也是这样。核能开发的历史已证明，人类能够创造意想不到的奇迹。因此不管夸克今天多么地捉摸不定，既然客观存在，总有一天我们会找到控制它的方法。那时，这种非常厉害的、不可思议的微观客体，将会向人类贡献出它所拥有的一切。

亲爱的少年朋友们！面对着一座又一座新技术的高峰，勇敢地攀登吧！