



# 绿色工业 动态

编译：工信部国际经济技术合作中心  
中国贸促会电子信息行业分会

第 11 期

2014 年 7 月 20 日

## 本期关注：后福岛时期的世界核电发展

——2011 年日本福岛核事故为世界核电工业发展蒙上了一层阴影，全球核电发展在经历了 3 年多的沉寂之后，开始走向复苏——除了部分国家由于政党政治的原因表示将逐步弃核之外，主要的核电大国和无核电国家都在根据自身情况开始推进核电发展。据国际原子能机构预测，全球有 60 多个国家计划发展核能，其中包括 30 个无核国家，全球核能发电量在今后 20 年将会提高一倍。我国作为世界最大的能源生产与消费国，面临着能源需求压力大、能源供给制约多、环境污染严重等巨大挑战。核电作为安全、清洁、高效的能源必将成为我国未来调整能源结构、推动能源革命的重要发展方向。

## 目 录

<b>全球核电概览</b> .....	<b>1</b>
核基础知识 .....	1
核燃料 .....	5
核燃料循环 .....	7
特殊的挑战 .....	8
铀市场供应：储备 .....	9
供应：生产.....	11
市场动态.....	14
前景.....	16
<b>核能会回归吗？</b> .....	<b>18</b>
承诺：创新.....	20
房间里的大象：天然气.....	23
解决方案用小型反应堆减少资本成本.....	24
解决方案之让所有发电厂都管理废物.....	26
解决方案之使用新技术加速研发过程.....	27
解决方案之解决“方钉圆孔”政策问题.....	29
解决方案之维持现有核电厂的运营.....	31
解决方案之打一场消除核恐惧之仗.....	33
正确，但我们是否应该？ .....	36
<b>关于核电，世界都在做什么？</b> .....	<b>38</b>
美国.....	38
英国.....	43
俄罗斯.....	46
法国.....	48
韩国.....	51
东盟.....	53
巴西.....	55
阿根廷.....	57
<b>核电站怎样利用大数据？</b> .....	<b>60</b>
全方位预测与健康管理工作.....	60
现有技术的局限性.....	62
软件是如何工作的.....	63
产业示范项目和技术转让.....	66

## 全球核电概览

编译：工业和信息化部国际经济技术合作中心 刘佳源 邵宇琦 金逸

### 要点速记

- 核能发电不会直接排放出温室气体且生命周期内的排放量很低。
- 美国有100个核电反应堆，在全球核电装机容量中占据最大份额（27%）。
- 与其它任何形式的发电相比，美国的核电拥有最高的容量系数，即单位时间内实际输出量与最大可能输出量的比率，大约在90%左右。
- 虽然铀储量排在世界前十，但美国商用反应堆所使用的铀中，90%都是靠进口。其中四分之三来自俄罗斯、加拿大、澳大利亚和哈萨克斯坦。
- 2011年日本的核灾难使得许多国家都开始重新考虑它们的核战略。但是，发展中国家将作为推动核电继续发展的主力军，尤其像中国和印度。

### 核电基础知识

核能最主要的用途就是用来发电，在海军舰艇与航天飞机上的使用相当有限。2011年，全球31个国家的核电装机容量为3690亿瓦特，占全球总发电量的11.7%，且不直接产生温室气体。2013年，核能发电已占美国发电总量的

19.4%。

核能是由核裂变产生，核裂变是由中子撞击一个质量非常大的元素的原子核后所引发的链式反应，撞击后大质量的原子核会分裂成几个质量较小的原子核，并以热量与辐射的形式释放能量。1克铀核聚变释放的能量相当于燃烧3吨煤所产生的能量。

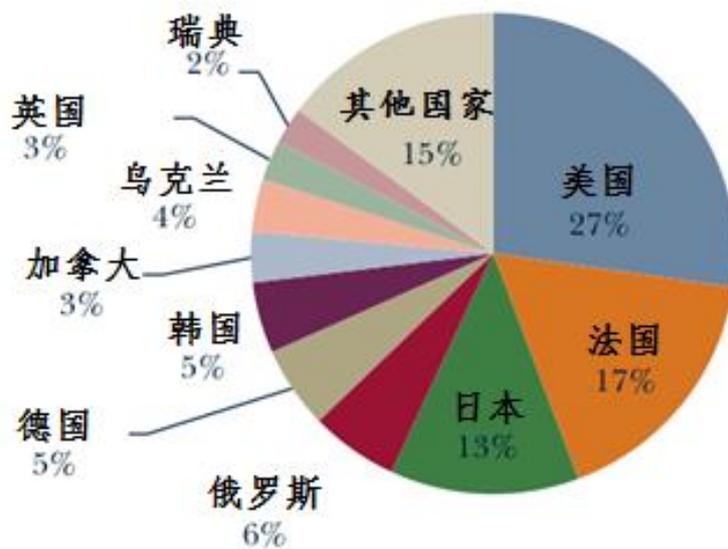


图1：世界核电装机总量

来源：国际能源署（International Energy Agency）

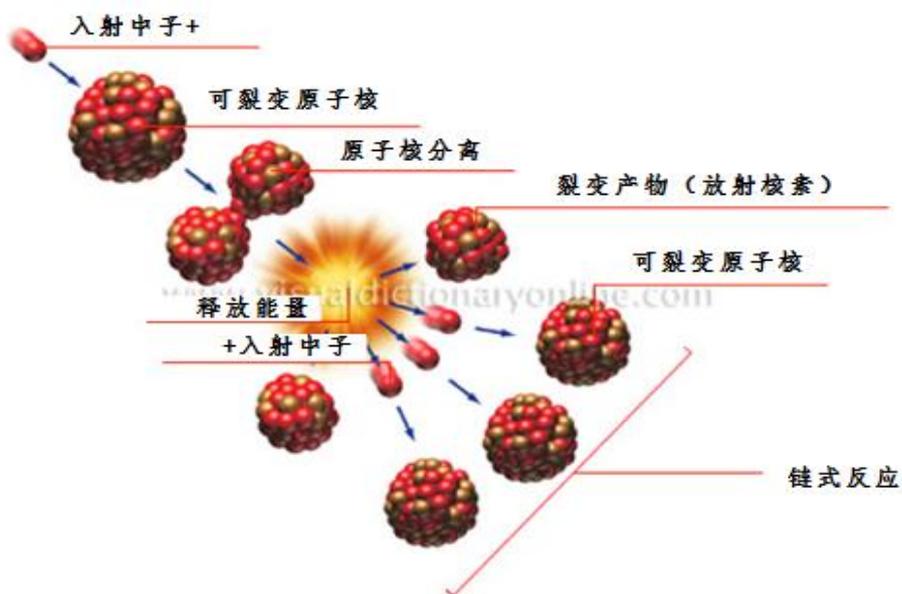


图 2：核裂变过程

来源：Visual Dictionary Online

在精确可控的条件下，核聚变是一个持续的链式反应，它释放出足够的热量产生蒸汽，蒸汽推动涡轮产生电力。  
核反应堆

美国所有的核电站都是轻水反应堆，因其使用普通的水来发电故称为“轻水”，加拿大则是重水（已知为氧化氘）反应堆。轻水反应堆的种类有两种：压力水冷反应堆和沸水反应堆。在压水堆中，水流通过反应堆芯时巨大的压力使其不会气化成蒸汽，而是通过一个单独的水流回路释放热量产生蒸汽，从而推动发电机。这样的设计可以将大部分的辐射都控制在反应堆中。然而在沸水堆中，水在反应堆槽中吸收热量直接气化为蒸汽来推动发电机。

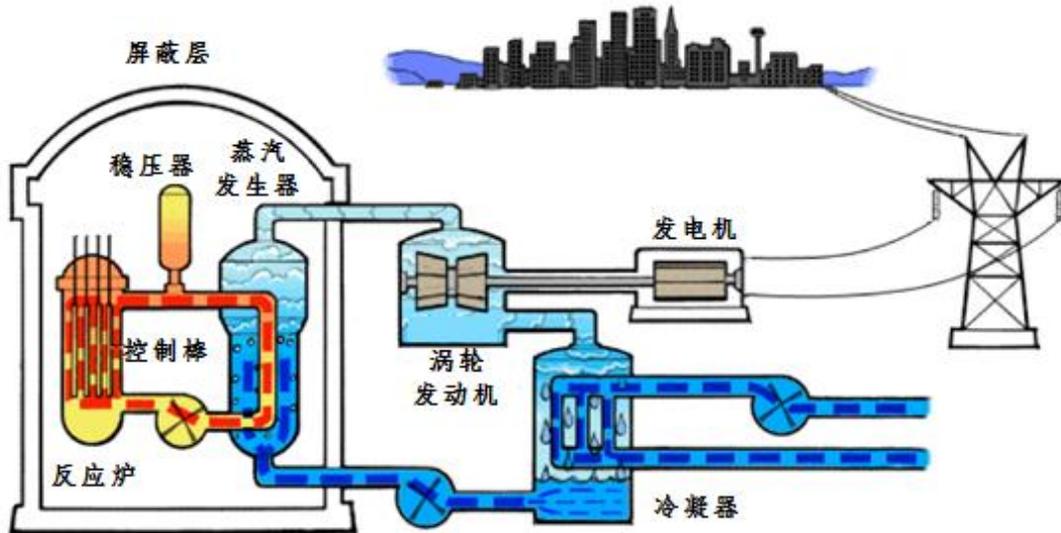


图 3：压水反应堆原理示意图

来源：美国核能管理委员会 (National Regulatory Commission)

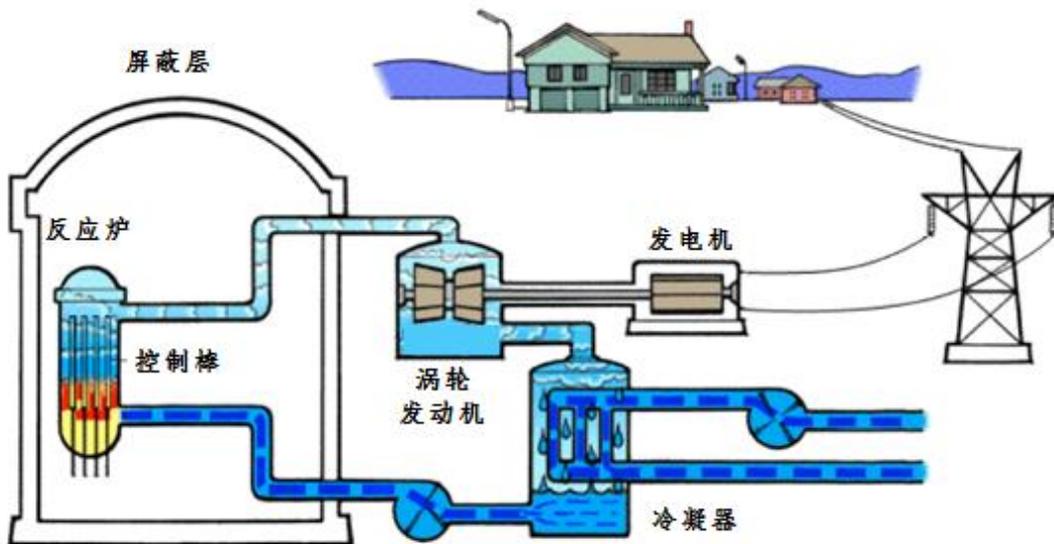


图 4：沸水反应堆原理示意图

来源：美国核能管理委员会 (National Regulatory Commission)

美国有65个压水堆和35个沸水堆。核反应堆通常会根据反应堆是第几代或者反应堆技术的发展水平来分类。

- 第一代：这一代反应堆是锥型，第一批商用核电站在20世纪50年代和60年代出现，如今几乎已经找不到仍在运

行的了。

- 第二代：这一代反应堆大约建于20世纪70年代和80年代，已经商业化。
- 第三代和第三代升级版：这一代反应堆出现于20世纪90年代和21世纪初。在设计上需要的组件更少，远没有第二代那么复杂，采用被动式的安全系统是它们的特征，即不再依靠操作员的人工操作和电子信息的反馈，这样在遇到紧急情况时就能更加安全地停止反应堆的反应。由于设计更加的简单，核电站的占地更少，建设成本也降低了。中国已经建成有第三代核反应堆并有一些项目在建，美国也有项目在建。
- 第四代：这一代反应堆在设计上将更加先进，在安全性、经济性、防止核扩散以及减少核燃料废物增加循环利用上做出革命性的改进，预计在2030年进入商业化应用。

### 核燃料

铀是自然存在的一种重金属元素，最常见的同位素是铀238，但它不能用来进行核链式反应。核电站目前主要使用另一种同位素铀235来作为链式反应的原料。要把自然界中直接可得的铀转化成核发电可用的铀燃料需要做一些加工处理。

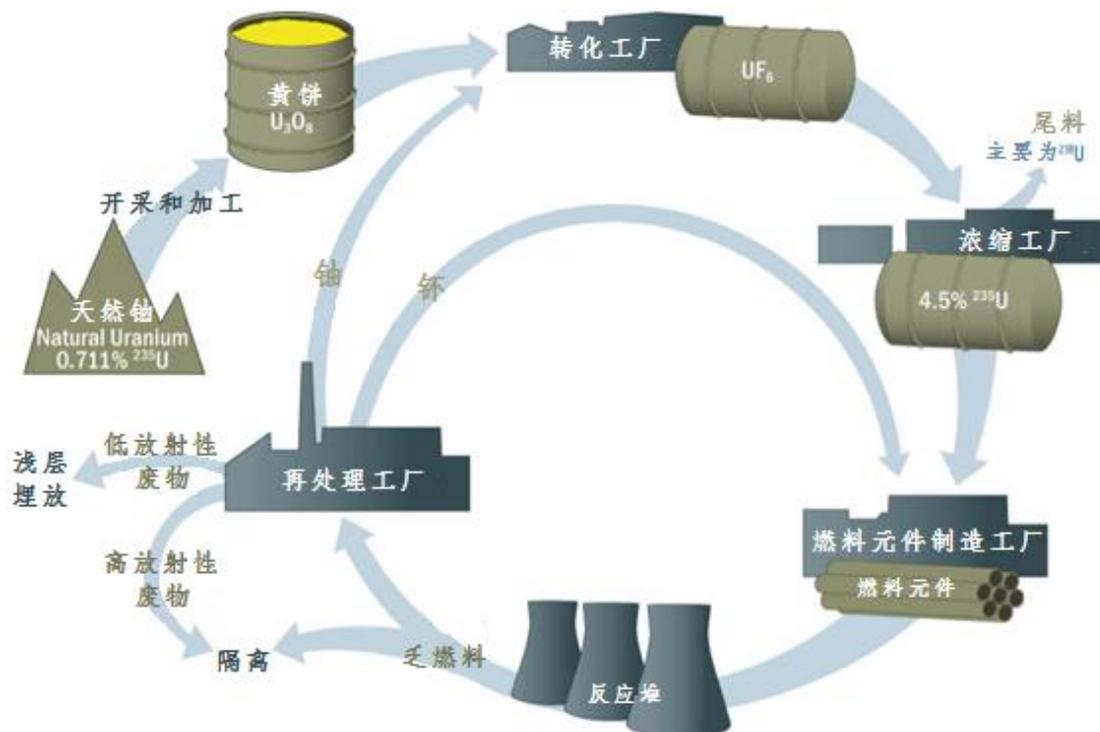


图 5：核燃料循环

来源：美国国会研究处 (Congressional Research Service)

铀可以通过多种方法来开采，如露天矿和地下矿。由于资本成本低廉，美国的大多数铀矿都采取就地开采的办法，用泵从地下将溶解在地下水中的铀抽出。挖掘出来后，铀矿将被磨碎并用酸性溶液过滤，得到高纯度的二氧化铀粉末，也被称作“黄饼”。

核电站的操作员通常会买下黄饼，然后签订合同交给第三方工厂来对它进行浓缩。世界上有5家铀浓缩的商业企业（见图5），它们分别位于美国、加拿大、法国、英国和俄罗斯。几乎所有的浓缩铀都由美国、法国、英国、德国、荷兰和俄罗斯这几国供应。

在浓缩之后，铀被注入陶瓷的燃料芯块并装进燃料棒中。核电站反应堆芯中使用的一个燃料单位就是这样的一

捆方形或圆形的燃料棒。想了解更多信息，可以查看美国核管理委员会的网页：核燃料的循环阶段与全球核管理。

当一份核反应堆燃料被用尽了，或者说没法再进行核链式反应时，它就必须被替换。通常标准的反应堆燃料替换周期从12个月到24个月不等，反应堆将停产几周来进行燃料补给和设备维护。

核废料中大部分为贫化铀（高达96%），还夹杂一些高放射性的元素，也就是核裂变的产物（比如铯和锶）以及钚和镅。其中头一个百年核废料的衰变与放射性主要以核裂变产物为主，其它的成分在这之后还会延续几千年。

### 核燃料循环

传统的一次性的燃料循环（美国目前采用的方法）包括浓缩铀燃料的使用以及核废料的处理。另外还有两种循环方式可供选择，单程再利用法和全封闭循环法，后者是将来可能的技术。单程再利用法（目前在法国被使用）包括核废料的再加工，即将易裂变的铀和钚从废料中分离出来。这些物质可以被回收再次做成核燃料。这种方法将减小需要处理的核废料的体积，但不一定能减少核废料的衰变热和放射性。

麻省理工学院的一项研究表明，单程再利用这种方法的成本要比一次性燃料循环的成本要高，此外全封闭循环法带来的好处无法抵消随之而来的安全性、经济性和环境

保护的问题。在全封闭循环法的一种建议方案中，将核废料和分离出来的铀、钚和其它具有长期放射性的元素一起再加工做成核燃料，这种方法减少了衰变热和放射性，降低了最终的核废料中放射性同位素的含量。然而，这种方法下的核废料仍然需要长期处理，因为其中的核裂变产物和加工过程中产生的废料仍然具有长期性，还需要永久的地质处置。全封闭循环法还需要更先进的快速燃烧反应堆，这项技术目前还没有投入商业运营。从理论上讲，快堆产生的核废料可以被反复加工直到循环过程中所有的铀都转变为有用的燃料，而所有有用的燃料都完成了聚变。

### 特殊的挑战

虽然核能发电不直接排放温室气体和其它空气污染物，全过程中总体的温室气体产生量也比化石燃料要低，但是核发电具有一些特殊的挑战和风险。其中最大的风险（虽然发生概率很低）就是堆芯熔毁。自从20世纪50年代核能时代大幕开启以来，全球核电行业经历了三次重大的核反应堆事故和几次燃料循环设备故障事件，其中最近的一次是2011年日本福岛核反应堆事故。核反应堆的损坏对公共安全是一个巨大威胁，因为它的放射性可以污染空气和地下水。迄今为止，包括商用核电反应堆在内美国还没有发生一起放射性直接伤害或致死的公共安全事件。

在美国人们还对废燃料棒中放射性废弃物的存储问题

感到担忧。在法国，废燃料棒中的钚元素被分离出来和铀一起加工再次做成核反应堆的燃料。美国目前还没有采取对废燃料进行再加工的做法，一是担心废燃料中的钚元素会造成核武器的扩散，二是废燃料再加工的成本比一次性燃料循环要高。目前对废燃料棒的处理工作在核电站就地展开，先将废燃料棒放进一个特别设计的水池中冷却几年，然后再用干燥的储藏容器将它就地封装起来。目前在美国，关于这些核废料的储存是一个重大的公共政策问题。

在全球范围内，人们担心核武器会传播开来，也就是核扩散。民用核能发电的许多技术和原料也能被用来制作核武器。像国际原子能机构这样的组织监控着全球范围内的核项目，以确保它们的安全和透明。此外，第四代核能系统国际论坛也为未来核能的发展选定了6种反应堆技术，以防止核原料被挪用到核武器上。

### 铀市场供应：储备

三种明显的分类描绘了关于铀资源存在状况不同水平的信心。合理确定资源指能够利用现有开采技术和采矿方法经济地获取的铀估计量。在美国，术语“储备”可以和合理确定资源互换使用。估算额外资源是在合理确定资源基础上，再包括主要以未开发矿床的地理迹象为基础的可能铀资源，以及定义明确的矿床附近尚未勘察的矿床。除了估算额外资源外，推测资源包括主要根据直接证据和地

质推断存在的铀。

期货价格包括未来所有生产中将会产生的运营和资金成本，用来估计能够从不同地质环境中提取的铀矿总量，并且独立于这些储备产出铀的市场价格。1975年起，由于铀勘探支出的扩大，世界储备估量上涨了将近三倍。2009年经济合作与发展组织的核能机构报告称，以每磅59美元的期货价格，用于浓缩氧化铀的全球铀储备大约有77亿磅。在此期货价格上，澳大利亚拥有最多的已知可采资源26亿磅，几乎占了世界总量的三分之一。美国以4.57亿磅排名世界第六。相比之下，以每磅50美元的价格，美国能源信息署估计美国有5.39亿磅铀“黄饼”可供开采。

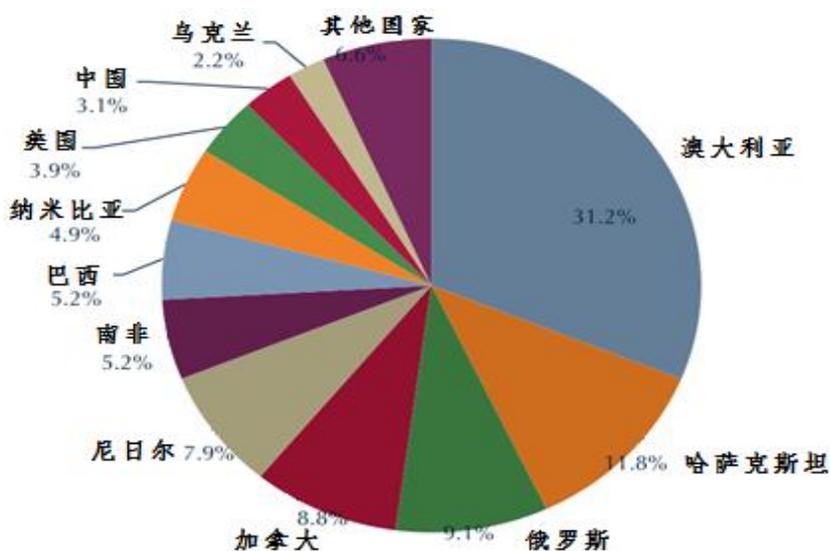


图6：已知可开采的铀资源

来源：世界核能协会（World Nuclear Association）

美国大部分的铀储备在其本土西部。2008 年，怀俄明州的铀储备总量全美第一，新墨西哥州排名第二。综上所述，这两个州的储量占最高可达每磅 100 美元的铀“黄饼”估计可用储备的三分之二，占低于每磅 50 美元的铀“黄饼”估计可用储备的四分之三。

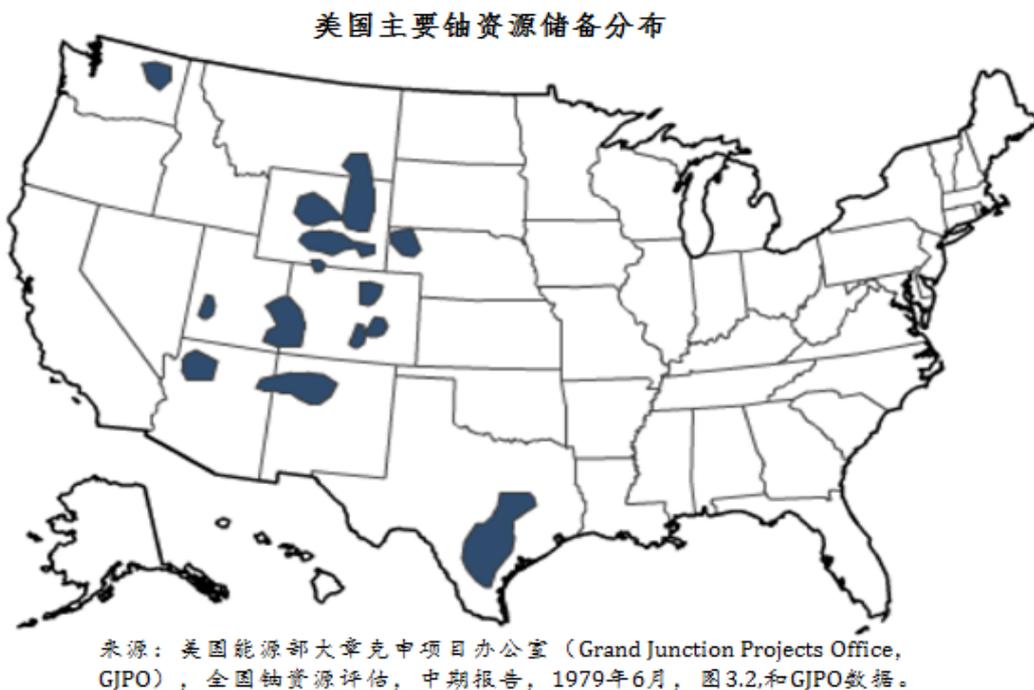


图 7：美国主要铀资源储备位置

来源：美国能源信息管理局（US Energy Information Administration）

### 供应：生产

2012 年，世界铀资源出产了将近 1.29 亿浓缩铀。其中大约 37%来自哈萨克斯坦，15%来自加拿大，12%来自澳大利亚。

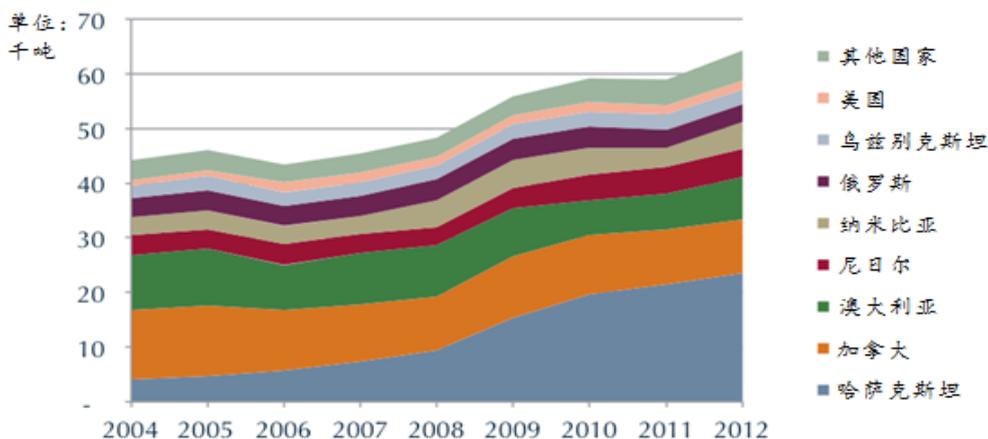


图 8：世界铀矿产量  
来源：世界核能协会，2014 年

大约 45%的生产来自原地浸析采矿，28%来自传统的地下采矿，17%来自露天采矿，剩下的来源于其它采矿活动的副产品。90 年代以来世界整体生产都有所增长。

美国的铀生产和开采在过去 60 年发生了巨大变化。50 年代的铀生产最初是由政府激励的，随着关键储备的发现，造就了 50 年代铀的繁荣。60 年代浓缩铀生产有所下降，但在 70 年代的能源危机期间又上升了，在 1980 年达到顶峰。2011 年，来自 8 个矿床的生产量为 400 万磅。



图 9：美国铀浓缩物产量  
来源：美国能源信息管理局，2014 年

其他可裂变物质来源包括：民用和军用铀库存以及来自乏燃料再加工和军用钚的核燃料。“Megatons to Megawatts”项目转化了 17698 个俄罗斯核弹头来给美国发电厂供应燃料。这个为期 20 年的项目于 2013 年结束。

需求

电力领域是核能的主要客户，小部分用于船舶推进和宇宙飞船。从 1980 年到 2011 年，全球核电装机量以每年 3.3% 的增速增至 369GW。同期美国的装机量以每年 2.2% 的增速增至 101GW。

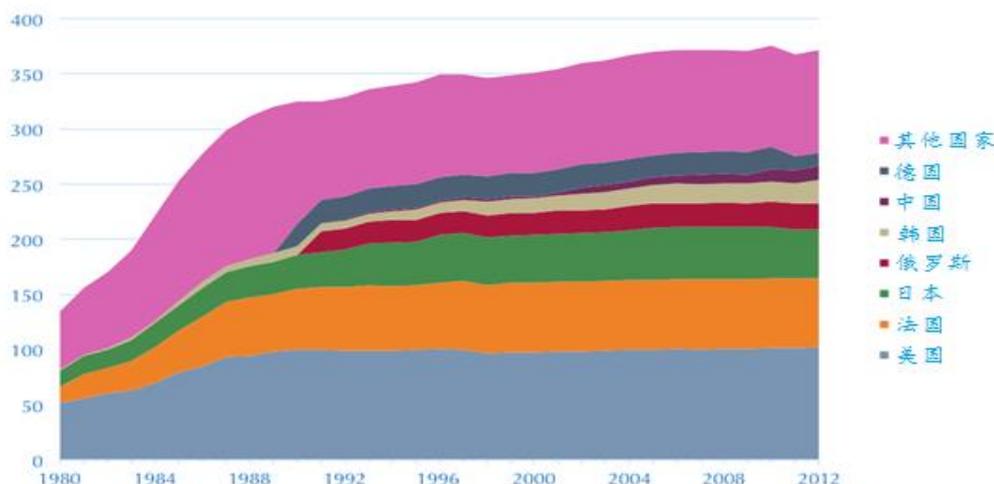


图 10: 全球核电装机总量 (GW)

来源：美国能源信息管理局，2014 年

美国核能发电能力占世界总核能发电能力的 27%。2012 年，31 个州 65 家发电厂的 100 个核反应堆供应全美电力的 19%（大约 7690 亿千瓦时）。

2012 年，美国民用核电反应堆业主和经营者购买了相当于 5800 万磅（29000 吨）的铀。美国核电厂购买的铀 83% 来源于进口。2012 年，来自澳大利亚和加拿大的铀一共占

铀采购的 36%，而来自哈萨克斯坦、俄罗斯和乌兹别克斯坦的铀占 29%。

广泛认为如果需求大幅增长超过当前和预计水平，几十年内铀资源仍然充足。在民用核电的头三十年里，铀生产多于世界需求。结果导致大量军用和民用铀库存，在随后一些年才使用。

### 市场动态

加工成本占铀最终成本的 88%，但它在其他电力燃料的最终成本中占比更小，比如煤（42%）和天然气（33%）。但是不像化石燃料发电，铀的成本只占核电总成本的一小部分。同样地，如果燃料成本增长一倍，煤的发电成本将增加 50%以上，天然气增加 90%以上，而核能只增加 10%到 15%。

铀市场有很多特征能将它区别于其他能源和商品市场。由于铀的应用限制很多（即核武器和核电厂燃料），只有有限数量的供应商和客户。此外，铀在以冷战划分的两个分别市场上进行全球贸易-美洲、欧洲和澳大利亚在一个市场，俄罗斯，前苏联国家、东欧和中国在另一个市场。冷战期间，铀用于核武器是首要需求驱动。然而冷战结束后，铀市场开始更贴近一个传统商品市场了。

随着反应堆订单日益增多，70 年代初期铀的世界现货价格有所增长，但在 1979 年三哩岛事故后大幅下降。特定

行业事件（如核电站或核处理设施事故）或二级供应来源涌入（来自核武器-“Megatons to Megawatts”项目）对铀价产生很大影响。2003 年底开始，在一段持续相当长的低价期后，全球铀价开始上涨。这是由于新兴经济体如中国和印度扩张核电站，还有核能可以在几乎没有温室气体排放情况下供应可靠基本负载电力的共识。既然铀不像其他商品那样在公开市场上贸易，买卖双方就在私下协商合同。价格由独立市场顾问 Ux Consulting 和 Trade Tech 发布。

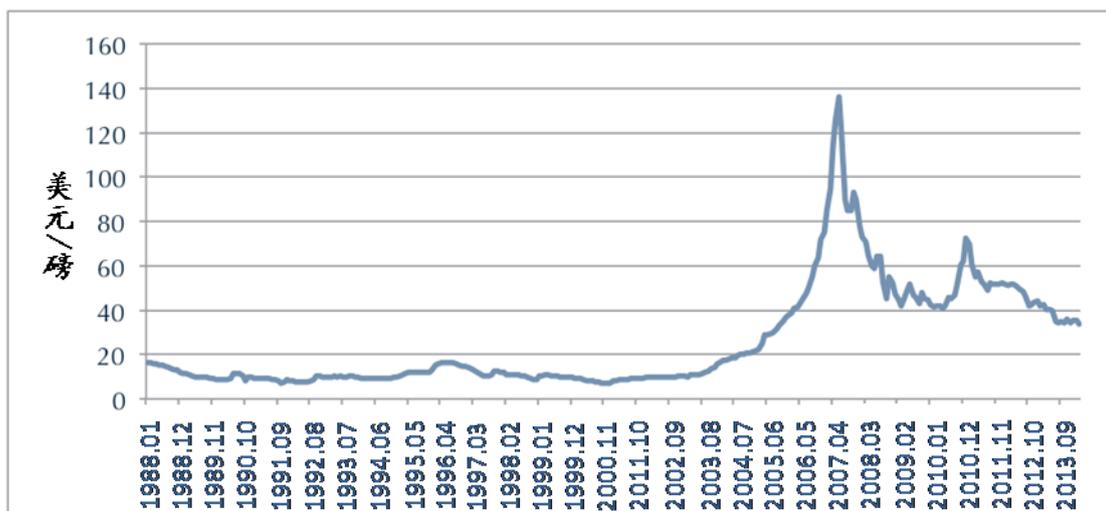


图 11: 铀现货价格(来源: Cameco, 2014 年)

在美国，浓缩铀市场的区别在于原产国和合同类型。2012 年所有购买的加权平均价格是每磅 54.99 美元。以每磅 51.04 美元的价格销售，现货合同占 14%，然而剩余的是以每磅 55.65 美元的长期合同出售。2004 年以来平均价格上涨了 4 倍以上。

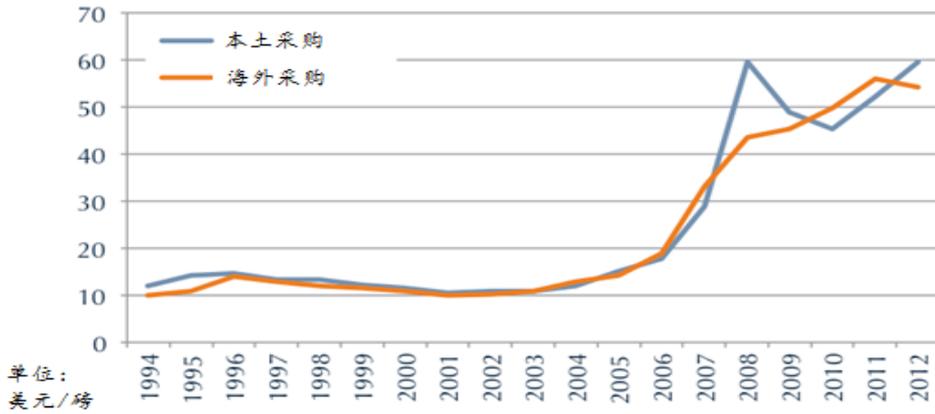


图 12: 美国民用核电反应堆所有者和运营者购买铀的年加权平均价格  
来源: 美国能源信息管理局

### 前景

至 2040 年, 全球核能发电能力预计以平均每年 2.1% 的增速增至 717GW。由中国和印度带领, 发展中国家的增长预计高于发达国家 7 倍以上。

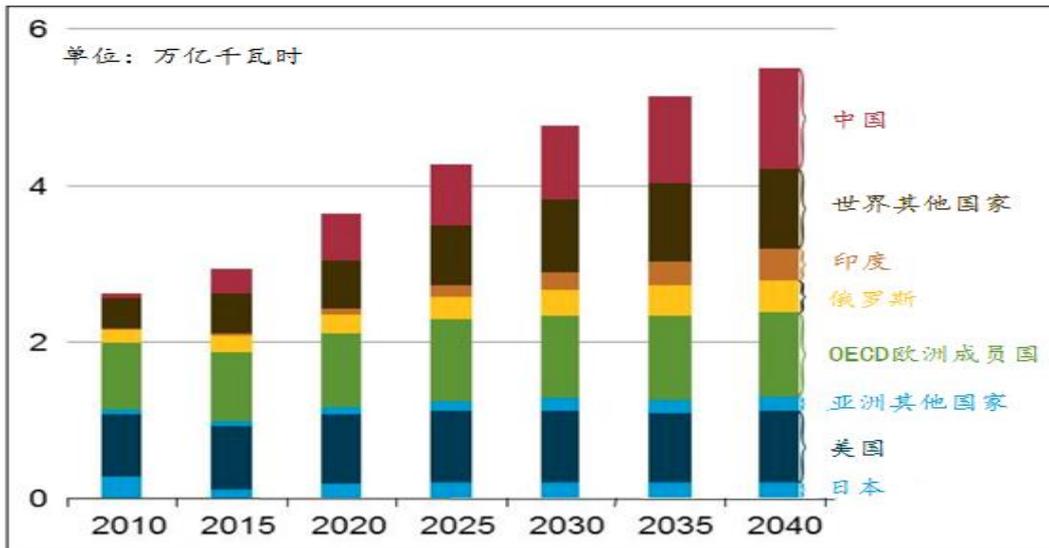


图 13: 2010-2040 年世界各地核电净发电量  
来源: 美国能源信息管理局, 《2013 国际能源展望》

至 2040 年, 美国核电站的发电量预计以平均每年 0.2% 的增速增至将近 8110 亿千瓦时。但它的总发电量占比预计下降到 16%。在这个期间的末段, 中国将超过美国成为拥有

最大发电能力-160GW 的国家。

尽管 1997 年和 1998 年有 5 家工厂被淘汰，由于现存工厂发电容量的修改，现在的核能发电容量比 1996 年稍高一些。Exelon 是美国最大的核能发电运营商，期望在 2017 年前通过修改一些现有工厂定额来加上额外的 1300MW 核能发电容量。它还计划在 2019 年末淘汰 Oyster Creek 核电站（636MW）。TVA 打算在 2015 年 Watts Bar 2 号机组上线的时候扩大发电容量。美国核管理委员会批准了南方电力公司（Southern Company）2012 年 2 月 Vogtle 核电站双反应堆扩建和 Scana 公司 2012 年 3 月 Summer 核电站双反应堆扩建的建设和运营许可。从 2007 年到 2009 年，一些公司提交了新反应堆许可申请，2012 年，有涵盖 8 个新的反应堆的三项申请，包括新的创新性模块式反应堆。对美国核能重新燃起的兴趣是由意在支持清洁能源技术的政府贷款担保激发的。尽管核能在世界上广泛应用，最近的日本核事故使得很多国家重新评估他们的核计划。鉴于这次灾难，日本决定停止 2030 年前建设 14 个新反应堆的计划，但仍计划未来重启反应堆。德国政策制定者正在推进 2022 年前关闭所有核反应堆的计划，瑞士也决定不再替换现有的 5 个反应堆。总之，随着对核安全的关注增多，受发展中国家驱动，尤其是中国和印度，预计核能使用将增多。

（来源：<http://www.c2es.org/energy/source/nuclear#Basics>）

## 核能会回归吗？

### —公众恐惧、不确定性和怀疑仍是核能发展的大问题

编译：工业和信息化部国际经济技术合作中心 邵宇琦

在波士顿这个暴风雪盛行的冬天，麻省理工大学(MIT)的研究生Leslie Dewan和Mark Massie刚刚通过了核能工程资格考试。在连月不间断的考试准备之后，他们突然有了充裕的时间。“我们说，我们再也不用每天学习16个小时了，”Dewan回忆道，“让我们一起做一些新奇而刺激的事情吧！”

当二月流逝，两位开始寻找把不同类型的核反应堆投入市场的方式，这能解决一些有关轻水核反应堆的问题，尤其是安全和废弃物争议，这类反应堆生产了当今世界几乎所有的核能。“我们都把自己当作环保人士，而且觉得核能是脱离化石燃料(尤其是煤)最好的方式。”Dewan说。

这是最近渐渐流行的观点。“核能是不会释放二氧化碳的能源，对避免温室气体排放有所贡献，”工业说客集团核能研究所政策发展和供应商项目的执行理事Dan Lipman说。他重申了很多核能业内人士的观点，他们希望通过提高对气候问题的紧迫感，来重振该技术市场。

“整个社会都容忍了煤矿事故和天然气泄漏。”

一些气候学家和知名的非营利组织已经开始接受这个观点。可再生资源利用虽然在增多，但是也仅仅占美国电力来源的13%。



图 1：核电站

有关资源间歇性、不成熟的存储技术，电网稳定性和土地使用的担忧困扰着可再生能源快速增长的情况。结果仅仅实现由环保署(EPA)提出的清洁能源计划(Clean Power Plan)中适度减少碳排放的目标，即2030年前要比2005年的水平减少30%，都需要建立新核电站，并且延长那些上世纪70年代建立的核电站寿命。

批评者很快反驳了这些言论，他们将成本、安全性、废弃物管理和上市时间等作为因生产基本负载电网电力而大规模使用核能的主要障碍。但是这些真的是无法逾越的

挑战吗？如果核能将在低碳能源未来中扮演重要角色的话，需要怎样做来实现呢？

### 承诺：创新

这也是Dewan和Massie会问自己的问题。到2010年夏，他们已经发现所谓“新奇而刺激”的事情，即让核能真正成为低碳未来的可行部分，一点也不新鲜了。

熔盐反应堆（MSRs）由橡树岭国家实验室（Oak Ridge National Laboratory, ORNL）开发并试验，是当时出现的几个反应堆设计提议之一，也是最有前景的开发之一。

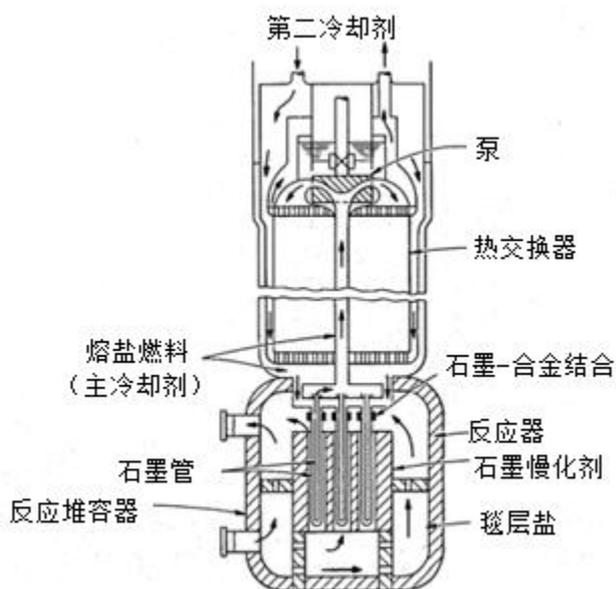


图 2：熔盐增殖堆

1964年的一个进展报告给橡树岭国家实验室的熔盐反应堆实验（Molten Salt Reactor Experiment, MSRE）奠定了基础，项目总监R. Beecher Briggs描述了系统液体燃料设计的特殊优点。低运行压力，被动冷却设计，再加上

燃料保持运转，燃料和运行低成本形成了较低的资金成本，以及更简单的控制和安全系统。传统的轻水核反应堆没有这些优点。

简而言之，熔盐反应堆提供了更廉价和安全的核能。

Dewan和Massie用了几个月的时间来调查橡树岭国家实验室项目的研究发现。通过研究得出了结论，尽管仍有严峻的问题需要解决，核能科技的熔盐反应堆分支并没有因不可逾越的技术挑战而删减。1973年，当该项目撤资的时候，如橡树岭国家实验室所说，仍实现了熔盐反应堆实验的技术成功。

据Dewan和其他支持者所说，撤资该项目的主要原因之一是增殖反应堆非钚的优质来源，而钚用于核武器项目。当下，缺乏武器化潜力是一个卖点，却不是特别受欢迎。所以，Dewan和Massie在2011年4月成立了Transatomic Power，着手解决一些残留问题，利用天使投资约100万美金进行工作。



图3: Transatomic Power团队-Mark Massie、Leslie Dewan、Russ Wilcox

“我们改变一些原料来使核能变得更紧凑，功率密度更高，也更便宜。” Dewan 说。此外，他们发现了另一个好机会：提出的设计可以由传统反应堆产生的核废料供能。在传统核反应堆中，只有 4%-5% 的能源提取自供给动力的固体燃料棒。“这就是核废料很危险的原因，还有很多能量残存其中。” Dewan 说。

Transatomic Power 意在利用其他工厂的乏燃料，重新获得剩余能量（同时在最终废物流减少放射能力的强度及密度）。

但是，这一潜力到现在仍然只是潜力。Transatomic Power 的熔盐反应堆还在初始设计阶段，仅通过电脑建模和模拟完成。该公司在今夏晚些时候可能会宣布的系列融资，

将把其理念从模拟阶段移到实验室。

Transatomic Power并不孤独。事实上，核工业正在经历由新一代企业家发起的复兴运动，科学家和拥护者表示已经发现具有前景的机会，在提高核能科技安全性和可靠性的情况下降低成本。

不少公司推出了一些先进的反应堆设计。TED青少年演讲人Taylor Wilson，14岁时最先以他的核聚变设计吸引关注，也正在从事有关熔盐反应堆的工作。“核工业一直有很酷的事情发生，”Dewan表示，“人们正在开发和商业化大量新科技。”

### 房间里的大象：天然气

不是每个人都对行业前景这样热情。“他们的预期一天天减少，”科学工作者关怀联盟（the Union of Concerned Scientists, UCS）的资深研究员Edwin Lyman说，“核能正在边缘化。”科学工作者关怀联盟于上世纪60年代晚期成立，对于核电站的安全性一直表示担忧，但这不是Lyman对这类科技持有消极观点的原因。他说：“核能的首要挑战，是如何获得启动资金。”

如果你想了解核工业的现状，下图是很好的总结。

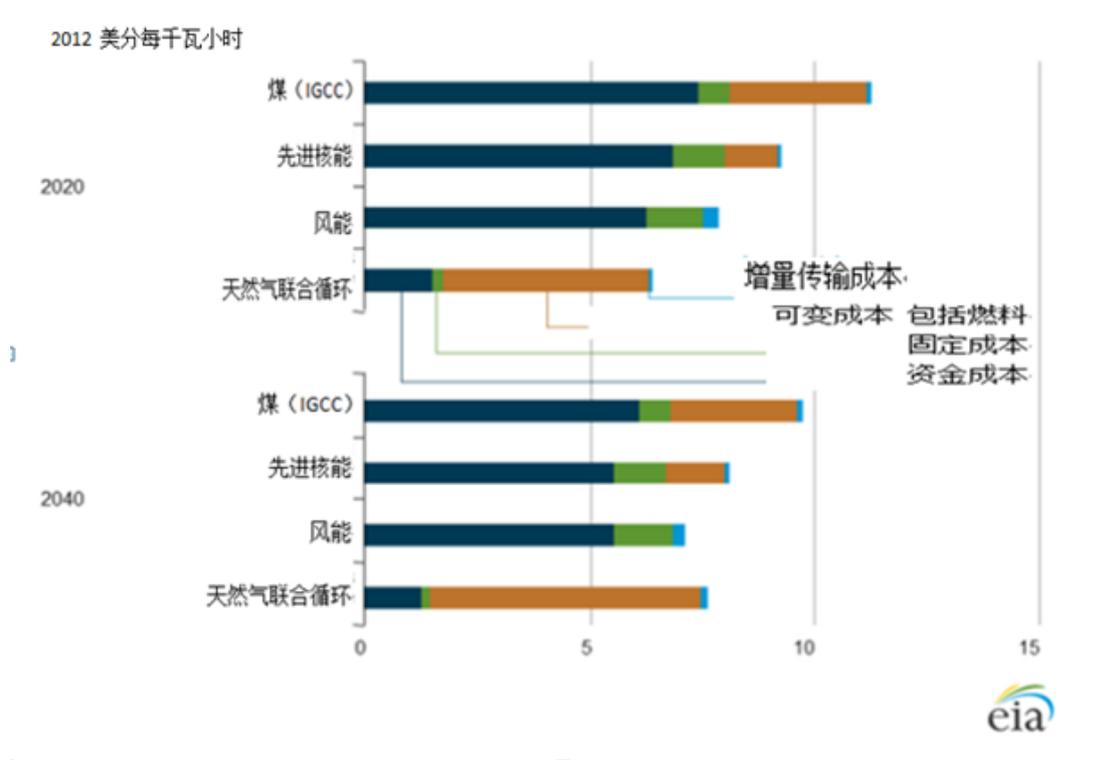


图4：2020年和2040年发电厂逐步降低的平均电力成本  
(不包括补贴，在参考情形下)

这是依据现状建设新核电站的成本表。条中的深蓝部分是建设新核电站的前期成本。可以看出，建设燃气发电站比任何其他种类的发电站便宜得多。美国国内天然气供应的迅猛增长也促使美国燃气价格急剧下降，结果它成为了无法拒绝的供应源，尤其是在解除管制的能源市场。这些情况对核能的发展很不利。

### 解决方案用小型反应堆减少资本成本

输入小型模块化核反应堆，简称SMR。支持者称，SMR能够打破阻碍核能发展的价格壁垒。说起核电站，人们想到的是庞大的工厂和规模经济，但SMR作为新型反应堆一改人们对核电站经济效益的看法。SMR设计多样，有的由常见

的轻水反应堆改造而来，有的设计新颖，但共同之处是，按照核工业的标准看，SMR体积十分小巧。

小型模块化核反应堆的能力可低至传统反应堆的10%。这种反应堆的设计目的是一次可增加若干单元，使公共事业机构前期投入期资本成本小，快速发电获取收入。

爱达荷州国家实验室（Idaho National Laboratory）核科学和技术国内项目主任Kathryn McCarthy说，“传统轻水反堆的资本成本动辄几十亿美元。每台小型反应堆的建造仅需要几亿美元，前期资本成本低得多。”

SMR能够节约成本是因为预制零部件能够高效地在中央工厂中进行大规模生产并检验。Dewan开玩笑地说，“我把它们看成宜家反应堆。”这个比喻很恰当，如果厂商能够实现扁平包装式的成本降低，SMR就能吸引公共事业的兴趣。

### ● 核能的未来尚不明朗

UC的Lyman对这种看法并不认同。“小型模块化反应堆的需求几乎全部由销售厂商和一小批拥趸带动，公共事业对此并不感兴趣”。Lyman说，这项技术的发展速度并不快。明日发明家都是“说大话的人，与现实世界脱节”。

然而，对此感兴趣的公司还是很执着。虽然大都清楚需求不大，也承认目前无法在美国市场上以低成本竞争，但他们表示并不会因此放弃努力。用Dewan的话来说，她相

信天然气价格将会回升，届时公共事业领域就会重新计算成本考虑建设何种发电厂。

她说，“过去一年当中，天然气价格不断升高。随着这种趋势的发展，其他能源成为不错的选择，公共事业部门也希望看到多样化的发电能源。”

NEI的Lipman同意她的看法。天然气价格的小幅上升将“改变核能新发展的格局”。同时，比尔·盖茨投资的新公司TerraPower选择把注意力转向海外。“不少国家和地区认为核能是既能满足能源需求、又能减少碳排放的能源选择。”TerraPower的技术整合总监Kevin Weaver说。

TerraPower正在寻求机会在其他国家部署核反应堆的设计，这些国家的能源政策更加支持核电发展。“这些国家是全员上阵”，他指出。“只要有需求，任务就能完成。从市场的角度看，政策能够推动发展。”

### 解决方案之让所有发电厂都管理废物

Weaver所指的政策之一，就是在全国范围内减少发电带来的碳排放。

根据核电领域人士的说法，其他发电站应该为其产生的废物造成的风险支付全额的价格。在他们看来，核电厂通过禁止排放重要的、对地球产生破坏性的副产品，使核电厂更加安全，其他电厂也应该如此。

大多数核能产业人员把碳排放视为迫切的风险，他们

希望对碳排放的监管力度能像对核废物的一样大。

美国核保险公司（American Nuclear Insurers）副总裁Mike Cass指出，如果其他能源来源，特别是煤和天然气也要为燃料来源的全生命周期影响负责，包括碳排放的影响在内，情况就大不相同了。他说：“把全部这些成本加起来，核能就变得可行了。”

当然，核废物并没有完全得到管理。美国的39个州目前共有46268吨使用过的核燃料放置在核电站，等待联邦政府建造最终存放放射性物质的设施。自亚卡山核废料仓库取消以后，这个问题在短时间内似乎不太可能得到解决。

但核能支持者指出，其他能源行业的废物清理问题同样庞大，只是不那么明显而已。因为碳、颗粒物和其他废物直接进入大气或水，而不是由发电厂储存。

“从某种意义上讲，核电厂拥有核废物是好事，”McCarthy如是说。“废料在我们手上，并没有引起酸雨或雾霾，没有对大城市造成污染。核废料在我们手上是一种优势，我们可以对其加以处理。”不管是储存还是应用于Transatomic Power提出的新型反应堆上，核废物的处理依然是需要面临的挑战。

### 解决方案之使用新技术加速研发过程

对碳排放收费曾经被广泛宣传为可再生能源达到市电同价的唯一途径。但过去几年中，太阳能和风能在碳排放

没有收费的情况下成为可行的能源。大部分原因应归功于一系列技术进步和支持全行业创新的公共政策。当然，联邦政府和州政府目标明确的优惠政策，如税收优惠和贷款担保推动了此类发展。这些政策鼓励项目融资公司参与新能源领域“有风险的”新投资。

其他领域的技术进步推动了新能源的成熟发展并为其创造了机会。以风能为例，新型设计和材料科学的进展让风能发电机效率更高、价格更低。更好的模型和预测工具也让风场的选址、计划和上网容易得多。

在过去几十年里，核能一直从公共投资中获益颇多。忧思科学家联盟（the Union of Concerned Scientists）援引的一份预测表明，核能接受的补助总额达3000亿美元。而虽然新能源得到的补助相形见绌，在过去几年却持续增长。今天，核能产业称，在推动可再生能源和消费电子的相同技术趋势中找到了加速发展的新机会。

材料科学、制造技术和计算模型的进步正一点点解决上世纪中叶阻碍核技术进步的难题。“我认为，与上世纪70年代核能发展相比，新事物之一就是先进的计算工具”，爱达荷州国家实验室的McCarthy说，“电脑更快了，解方程的知识更多了，方程组求解的框架也有了发展。”爱达荷州国家实验室创造了MOOSE框架，即“多物理物体导向模拟环境”（multi-physics object oriented simulation

environment)。MOOSE能整合大量变量，帮助研究人员评估新型反应堆设计等。高级模拟能帮助研究人员发现潜在问题，问题解决后再把理论付诸实验室进行测试。



图5：MARMOT应用在爱达荷州国家实验室MOOSE模拟平台上运行，模拟核燃料裂变过程中的显微结构变化

燃料研究中没有增量受益，根据McCarthy的估计，从理念到商业发布通常需要20-30年的过程。有了MOOSE，“我们认为时间至少可以减半，”她说。“这真挺重要。”

### 解决方案之解决“方钉圆孔”政策问题

为了让这些进步达到现实世界，新型和改进型反应堆设计必须得到核能管理委员会（Nuclear Regulatory Commission）的许可。获得许可的过程很长，而且发明人员面临着根本没有现成程序支持他们的新技术的问题。使用新型燃料、特点不同寻常的小型核电站就像方钉一样，

无法进入核能管理委员会的圆孔。

例如,Transatomic Power反应堆在正常大气压下运行,无需像传统核电站一样建造成本高昂、形态厚重的外壳结构。但在现有监管条件下,他们不能省去外壳的建造,由此带来的附加成本会让公司(理论上的)商业计划打水漂。

忧思科学家联盟等警告称,为正在设计的新型反应堆“放松”标准可能带来危害,但如果现在不加大力度制定标准,核能管理委员会将会成为任何新技术都无法打通的瓶颈。核能管理委员会正在审查新的设计,并努力制定适应一系列创新技术的许可程序,但时间所剩不多了。

“最大的挑战是如何在保障安全的同时避免让经济问题雪上加霜,” Lyman说,“核心问题是,我们讨论的是如何在发生频率低但不可预测的事故中保护核电站。为保护核电站必须花费大笔资金,但事故却可能永远都不会发生。”

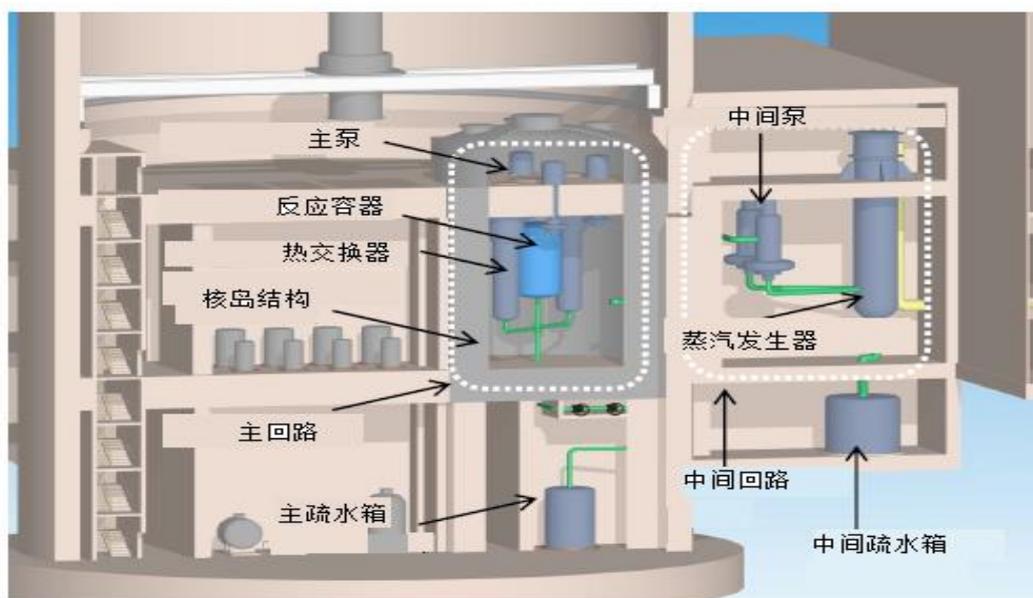


图6: Transatomic Power等的新设计正面临核能委员会现有认证程序的挑战

## 解决方案之维持现有核电厂的运营

从短期看，不仅是新建发电站要面对成本问题。天然气发电的经济适用性也给现有的发电站施加了压力。陈旧的核能（煤炭）发电站需要维护、维修和更新来保证其效用，投资者们也要求发电站有较好回报。考虑到电力需求增长缓慢，利用便宜的天然气来扩大发电量看上去是一项更好的投资。

至于煤炭发电的未来，对气候来说意义重大，天然气发电排放的碳污染要比煤炭发电少40%。核能发电难以替代天然气发电。加利福尼亚的圣奥诺弗雷核能发电站是一个很好的例子。



图7：圣奥诺弗雷核能发电站两年前被关闭了（南加州爱迪生电力公司）

两年之前，由于蒸气发电机被认定存在巨大风险，这个发电量达2.2吉瓦的发电站被勒令停业。在评估了通过改

进设备重新取得发电牌照这一方案的成本后，发电站的拥有者宣布将该电站永久关闭。巨大的供电缺口由此产生，其中40%的部分被建议用更好的方案代替（可再生能源、保护、存储和效率），剩余的60%很可能将由天然气发电来填补。

这就是为什么美国环保署（EPA）的清洁能源计划要延长现有核电站服役期限的原因。这项计划的提出是基于能源信息管理局（EIA）的评估：随着核能源成本的不断上升，核电站面临的财务挑战越来越大，这将使现有发电量减少6%。而美国环保署（EPA）指出，维持现有核电站的运营则可以避免多达200到300公吨的二氧化碳排放。

美国能源部轻水反应堆可持续技术综合办公室主任麦肯锡说，在核电站的第一次建设浪潮中，核电站被允许运营40年。但是这个决定是基于“经济性与反垄断”的考虑而做出的，“而不是基于已知的技术限制”。

随着40年大限的临近，美国国会通过了一个20年延期的决定，现在正努力让这些牌照再延用20年。麦肯锡说，“它们必须是经济的安全的”。除此之外，一些新技术也在努力研发中，INL正在开展一个项目致力于支持现有的核电站，“我们正在研发新技术，使得现有核电站运营得更有效率”。

## 解决方案之打一场消除核恐惧之仗

在最著名的正在运营的几个核电站中，有一个可能会让许多读者感到吃惊，它就是位于宾夕法尼亚州中部的三里岛核电站。

公众的恐惧、怀疑和不确定（行业内简称FUD）对核能的发展而言是个大问题，部分原因是因为核技术背后复杂的美国政治因素。要把核能问题和核扩散、战争、恐怖主义、国际政治等问题分离开来是困难的。但是1979年三里岛核电站第二反应堆的事故却在原本就已复杂的问题上又重重地加了一笔。它改变了美国公众对核电站的态度，抑制了核能产业最初的发展。

三里岛事故被查明是由人为操作失误引发的，这也是迄今为止美国发生的唯一一起重大核事故。在事故过去的几周甚至几个月内，公众对核事故的焦虑并没有减轻，相反却因当局对事故信息的遮遮掩掩而加重。

无论如何，这场事故都摧毁了公众对核能利用的信任。即使是在福岛核事故发生前，在公众情绪最乐观的时候，也只有不到60%的美国人同意新建更多的核电站。多个调查结果显示，新建核电站的支持率现在还不到50%。

但是公众的态度并不能正确反映出核能发电的真正风险。不错，三里岛核事故是严重的，但是有多严重呢？

三里岛事故中未被损坏的反应堆今天仍在运转，仍在

发电。2013年，这个发电站总计发电6.68百万兆瓦时，足够为80万家庭供电。此外，也没有证据证明该事故对健康有确切的不利影响。

2011年一份对1982到1995年间人口研究的数据表明，三里岛事故人群中上升的癌症风险与受到过低水平辐射照射的相关性很小，在统计学意义上不显著。此外，对数据还做了进一步深入分析，探究该事故与男性白血病之间的相关性，结果没有发现对健康有明显的影响，这与大多数对这一问题展开研究的研究结论一致。

麦肯锡评论说：“这种现象有些有趣，我们这个社会可以忍受煤矿的矿难和天然气的爆炸事故，这一类新闻出来后没几天就被人遗忘了”。但是核事故却不同。“三里岛核事故已经被证明是人为操作引起的，核技术本身并没有问题，但仍然……”她的声音越来越轻，“我们为此失去了资本的投资，但其实并没有造成什么健康危害，我试着去理解公众的这种恐惧”。

科学家、研究者和保险公司一次又一次地表明，核能发电站并不像公众所想的那样可怕。比方说，你是否知道实际上一个核电厂发出的辐射量要比一个煤电厂发出的还要少？或者你是否见过下面这样的图表，它表明因煤电厂（包括空气污染）死亡的人数远远超过因核电厂死亡的人数。

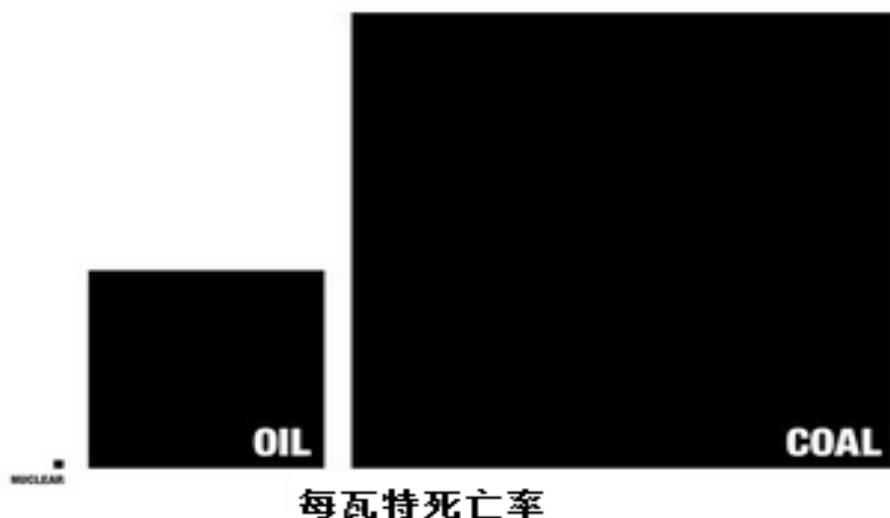


图8：各类型电厂死亡人数对比

甚至早前关于日本福岛核电站事故中辐射量的一些研究，也得出了审慎乐观的结果：在一所距离福岛核电站57.8公里的教育机构内做的研究表明，辐射的剂量并没有对进行日常学习活动的学生们的健康产生影响。

如果你想得到更加确切的证据，那就看看美国核保险公司（ANI）的态度。这家公司提供第三方责任核保险，其范围涵盖了从铀矿石被注入反应堆一直到被装进废物处置设施中的全过程。

该公司的卡斯说：“作为一家保险公司，我们认为核能发电是一项合格的安全的技术，它是工业化运营的，从工业化运营的角度来说它安全得让人难以置信。我们提供设备的保险，这是一项不错的交易”。要知道，三里岛核电站就是在这家公司投的保。

“我不是诡辩”，卡斯说，“这都有数据支撑，都是

真实发生的。关于辐射的科学研究很充分，它是全球最著名的致癌物，很多研究结果都支持这一论断。”卡斯指出，三哩岛核事故中，只有极少数的保险获得了赔付，而且几乎都是因为地区疏散导致失去机会或营业中断获得的赔付。

现在，美国核保险公司（ANI）正在寻求推出更多的核保险政策。自从2000年中期以来，投资者对这家公司所提供的保险的兴趣就超过了消费者对它们的兴趣。卡斯说：“如果我们觉得不值得去做，就不会为它提供保险”。

### **正确，但我们是否应该？**

今天，核能的未来还无法确定。

虽然，有很多的核能拥护者已经找到了未来的发展路径，但是我们是否可以、是否应该按照这样的路径去发展却又是另一个问题，我们还需获得公众和政策的支持。另外，核能发电的经济性也仍旧是一个很有挑战性的问题。

天然气的价格有可能会上涨，虽然上涨多少、上涨多快并不知道。基础设施建设和对当地环境日益增长的担忧正在给这个新兴产业施压。作为天然气替代品的低碳能源的发展态势良好，包括可再生能源、存储，当然还有核能。

但即便是保持这样良好的趋势，如果未来没有在研究开发、贷款担保和税收优惠上的公共投资，新增的核能发电量也可能无法填补眼下能源供需缺口。核能的拥护者和反对者们都同意这一点。他们一致认为，在当下要想联邦

政府加大对核能相关领域的投资是不可能的。

“问题是，该不该启动一项曼哈顿计划来建造最完美的核能发电站？”忧思科学家联盟（UCS）的资深科学家莱曼说，“很不幸，联邦政府对此可不感兴趣，政府已经资助了大量的研究开发项目。”

这样的情况是否应该改变，这很可能是接下去几个月甚至几年内要辩论的一项主要政策。事情似乎在不断升温。就在这一周，美国政府问责局表示，能源部（DOE）先进的反应堆试点项目已经进入筹备阶段，希望以此配合环境署（EPA）的碳管制计划的实施。

而就在上个月发布的一份报告中，佛蒙特法学院能源与环境研究所高级经济分析师马克·库珀指出，“作为气象政策的关键点，提出要开发核能使得之前在经济资源与政策制定上所做出的巨大努力加速进入了解决方案的筹备阶段，这个方案更具吸引力，成本更低，风险更小，对环境更加友好”。

根据库珀的分析，对核能的投资将会使得对可再生资源 and 存储的投资减少。

INL的麦肯锡并不同意，“我们所讨论的问题与国防预算无关，我们是一个富裕的国家，有这样的实力，关键是我们不想去做”。

（译自：2014年6月24日【美国】<http://www.theatlantic.com>）

## 关于核电，世界都在做什么？

来源：中电新闻网

**编者按：**在经过福岛事故后一段时间的沉寂之后，全球核电市场正在复苏——除了部分国家表示将逐步弃核之外，主要的核电大国和无核电国家都在根据自身情况开始推进核电发展。我国在福岛事故之后，也经历了核电政策的调整，其中核电走出去已成为政经界的共识。海外核电市场有哪些机遇和挑战？关于核电，世界各国都在做什么？本报试图将目前世界上主要核电大国和新兴市场的核电发展计划和方向进行梳理，以供读者参考。

### 美国

●美国是世界上最大的核电生产国，占全球核能发电的30%以上；

●2013年，全美100多座核反应堆发电7890亿千瓦时，占全部电力输出超过19%。目前全美有100台在役核电机组和5台在建机组；

●在这30年里全美只新建了非常少的反应堆，预计到2020年有6台新机组将投入运行；

●然而，自从2009年天然气价格不断下降，让现存的一些反应堆和拟议计划受到了质疑。

2012年，全美发电总量为43000亿千瓦时，其中16400

亿千瓦时（38%）来自燃煤电厂，12770 亿千瓦时（30%）来自燃气发电，8000 亿千瓦时（19%）来自核电，2980 亿千瓦时来自水电，1410 亿千瓦时来自风电。虽然电力需求在短期内会相对低迷，估计到 2015 年才能恢复到 2007 年的水平，但预计到 2030 年将达到 50000 亿千瓦时的用电需求。2011 年，年人均用电量为 12150 千瓦时。总装机容量为 1055 吉瓦，其中不到十分之一来自核电。

美国有 100 个核反应堆分布在 31 个州，被 30 家不同的公司运作管理。从 2001 年开始，这些电厂的平均利用率就达到了 90%以上，每年生产超过 8070 亿千瓦时的电量，占总发电量约 20%。直到 2013 年利用率才突破 90%达到 91%，每年在维护和升级核电产业的投资约有 75 亿美元。

美国有 65 个压水反应堆（PWRs）和 35 个沸水反应堆（BWRs），其装机容量分别为 64 吉瓦和 34 吉瓦，总装机容量可达 98951 兆瓦。美国几乎所有核电反应堆都建造于 1967~1990 年，从 1977 年到 2013 年，都没有建造新的核电反应堆，这主要是因为人们长期认为天然气发电更加具有经济吸引力。

尽管在过去的 30 多年里，美国核电新建几乎停滞，但对核电的依赖性却持续增长。美国核电贡献已经发展到占全球比重超过 30%的现状，其中这些增长都是来自 47 个建造于 1977 年前，并到 70 年、80 年后期投入运行的反应堆。

美国核工业已经通过对现有的电厂改进燃料、维修和安全系统在电厂利用率方面获得了可观的收益。

美国目前正在建的核电机组有5台,其中4台为AP1000,另外一台为Westinghouse PWR。

项目: WattsBar 核电站 2 号机组; 建造地址: 田纳西州; 机型: Westinghouse PWR; 装机容量(兆瓦): 1218; 开发公司: 田纳西河流域管理局(Tennessee Valley Authority)。Watts Bar 核电站 2 号机组的建设从 1985 年推迟到 2007 年, 将于 2015 年建成发电, 将成为美国近 20 年内首个投入运行的核反应堆。为了便于工人操作以及历史问题, watts Bar 核电站 2 号机组虽然是由西屋公司负责设备服务, 但是并没有使用 AP1000, 而是采用 Westinghouse PWR 技术。

项目: Vogtle 核电站 3-4 号机组; 建造地址: 佐治亚州; 机型: AP1000; 装机容量(兆瓦): 2400; 开发公司: 南方核能运营公司(Southern Nuclear Operation Company)。Vogtle 核电站 3 号机组是美国开建的第二台 AP1000 核电机组, 于 2013 年 3 月实现 FCD。4 号机组于 2013 年 11 月实现 FCD。Vogtle 核电站 3 号机组目前预计将于 2017 年第四季度商运, 4 号机组的投运时间为 2018 年第四季度。届时, Vogtle 将成为美国唯一一座拥有 4 台机组的核电站。

项目: V. C. Summer 核电站 2-3 号机组; 建造地址: 南

卡罗来纳州；机型：AP1000；装机容量（兆瓦）：2400；开发公司：南卡罗来纳电气公司（South Carolina Electric&Gas）。V.C.Summer 核电站是美国南卡罗来纳州一座内陆核电站。2号机组为全美30年来首台新建机组，采用AP1000技术，2013年3月实现FCD。该厂址还有1台退役了的实验堆（Carolinas-Virginia Tube Reactor，简称CVTR）

目前美国提上建造计划日程的有5台机组（总装机容量为6063兆瓦），其中有三台获得联合许可证（COL）。

项目：Bellefonte 核电站；建造地址：阿拉巴马州。机型：B&WPWR；装机容量（兆瓦）：1263；开发公司：田纳西河流域管理局（Tennessee Valley Authority）。早在1974年，Bellefonte 核电站1号机组就获得了建造许可证。1988年，田纳西流域管理局决定暂停该项目。2009年，经美国核管会同意，该许可证重新生效，有效期至2011年10月1日。2013年10月，田纳西流域管理局提出申请，要求延长建造许可证的有效期。现在美国核管会已批准了这一申请，此举意味着该电站建造许可证的有效期将延长至2020年10月1日。

项目：William States Lee 核电站；建造地址：南卡罗来纳州；机型：AP1000；装机容量（兆瓦）：2400；开发公司：杜克能源公司（Duke Energy）。William States Lee III

核电项目为杜克能源公司计划开发的厂址，目前正在开展前期工作，据资料显示目前已经投入上亿美金。

项目：Turkey Point 核电站；建造地址：佛罗里达州；  
机型：AP1000；装机容量（兆瓦）：2400；开发公司：佛罗里达电力照明公司（Florida Power&Light）。Turkey Point 项目是佛罗里达电力照明公司正在推进的项目，计划建设两台 AP1000 机组，目前该厂址已建有两台反应堆（20 世纪 70 年代建造）。此处机组类型多样，核反应堆仅是其中一类，其他还包括两台燃气机组和一台燃油机组。

### AP1000 之外美国还将建什么？

目前美国提议建造 17 台大型核电机组和 7 台小型机组（装机容量 26000 兆瓦），其中除了 AP1000 之外，还有部分项目计划应用一些特殊机型。

项目：Comanche Peak 核电站 3-4 号机组；建造地址：德克萨斯州；机型：US-APWR；装机容量（兆瓦）：3400；开发公司：Luminant 电力公司。Comanche Peak 核电站是美国中部的一座滨库核电站，是一座典型的内陆核电站，已安全运行 20 多年。该核电站拟采用日本三菱公司的 US-APWR 技术再扩建 2 台核电机组。US-APWR，美国先进压水堆，由日本三菱公司开发。

项目：North Anna 核电站；建造地址：弗吉尼亚州；  
机型：ESBWR；装机容量（兆瓦）：1600；开发公司：道明

尼资源公司 (Dominion)。North Anna 核电站预计 2019 年实现 FCD, 采用 ESBWR 技术。ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor), 经济简化沸水反应堆是第 3+ 代的核能反应堆设计, 始于 90 年代后期, GE 工程师提出把简化沸水反应堆特点的被动安全设计, 与先进沸水反应堆设计结合, 另加大功率到 1600MWe 的方案。

项目: Calvert Cliffs 核电站。建造地址: 马里兰州; 机型: US-EPR; 装机容量 (兆瓦): 1710; 开发公司: 星座核能公司 (UniStar Nuclear)。Calvert Cliffs 核电站是座滨海核电站, 目前有 2 台 CE 公司生产的两回路压水堆机组在运, Unistar 核能公司拟利用 US-EPR 在该厂址再扩建一台机组。USEPR, 是目前正在芬兰、法国和中国建设的欧洲压水堆 (EPR) 的美国版本, 是一种 1600MWe 的渐进型压水堆设计。

## 英国

●英国拥有 16 座核反应堆, 发电量占全国约 18%。其中有一个反应堆将在 2015 年退休;

●英国具有完整的核燃料再循环设施;

●英国对新建的反应堆设计和它们的地址进行非常周密的评估;

●英国政府计划到 2030 年, 新建核电装机容量可达 16 吉瓦。

核电为英国提供了大约五分之一的电力供应，目前在运的核电站逐渐面临退役，在能源需求和应对气候变化的压力下，英国经过一番考虑，逐渐选择了和弃核的德国不同的道路。

2011年，英国发电容量为94吉瓦，其中天然气占30吉瓦，煤炭占23吉瓦，核电占11吉瓦，风电占5.2吉瓦，水电（包括抽水蓄能）占4.2吉瓦。而2011年用电峰值需求为57吉瓦。

到2012年，英国综合发电量为3630亿千瓦时，其中有700亿千瓦时来自核电（19%）。

目前，英国有16台核电厂在使用，总装机容量为11吉瓦。到2015年12月，型号为Wylfa1的Magnox反应堆将由于燃料用尽而关闭。届时，英国将还剩七个双胞改进型气冷反应堆（AGR）和一个压水反应堆（PWR）。

英国共计划建4台EPR机组，总装机容量为6680兆瓦。

项目：HinkleyPointC-1、HinkleyPointC-2；建造地点：萨默赛特（Somerset）。

项目：SizewellC-1、SizewellC-2；建造地点：萨福克（Suffolk）；机型：UKEPR；装机容量（兆瓦）6680；开发公司：法国电力公司（EDF Energy）。欣克利角核电站，分为欣克利A、B、C。A属于压水堆核电站，始建于1957年，2000年被关闭。B属于高温气冷堆核电站，1978年投

入运营，预计将于 2016 年关闭。C 正在筹建，中国广核集团将参与 C 项目资本运作。另外，英国还提议建造另外 7 台其他机组，采用 AP1000 和 ABWR 技术，装机总容量为 8920 兆瓦。

项目：WylfaNewydd1、WylfaNewydd2；建造地点：威尔士（Wales）

项目：OldburyB-1、OldburyB-2；建造地点：格洛斯特郡（Gloucestershire）；机型：ABWR；装机容量（兆瓦）：5520；开发公司：地平线核电公司（HorizonNuclearPower）2012 年 11 月份，地平线公司被日本日立公司收购，因此，地平线公司拥有的厂址被计划建造 ABWR。BWR，进步型沸水式反应堆（ABWR），是一款符合第三代反应器规范的沸水反应堆。由奇异日立核能（GEH）和东芝合作生产。

项目：Moorside1-3；建造地点：坎布里亚郡（Cumbria）；机型：AP1000；装机容量（兆瓦）：1135；开发公司：英国核退役管理局（NuGeneration）；Moorside 项目是英国新开发的核电厂址，位于目前英国最大的核电厂塞拉菲尔德核电站附近。

### 英国利好核电发展的因素有哪些？

- 精简的规划过程；
- 实施战略选址评价与战略环境评价；
- 电力市场改革提供电力的长期销售合同；

- 传统电站的退役将为核能投资创造巨大的空间；
- 立法保证退役和废物管理的经营收入；
- 欧盟碳排放交易计划的持续推进；
- 设立了“健康与安全局”负责维护公众免受危害；
- 通过广泛的融资机制及减税条款支持核电行业。

## 俄罗斯

俄罗斯目前总共运行的核反应堆有 33 个，总共装机容量为 24164 兆瓦：

- 4 座第一代的 VVER-440/230 或类似压水反应堆；
- 2 座第二代改进型 VVER-440/213 压水式反应堆；
- 11 座具有全面控制结构的第三代 VVER-1000 型压水式反应堆，多数是 V-320 类型；
- 13 座俄罗斯（除了立陶宛瓦外）独有的 RBMK 轻水石墨反应堆；
  - 4 座小石墨慢化沸水堆反应堆；
  - 一座 BN-600 快速增殖反应堆。

俄罗斯是世界上第一个建造核电站的国家（建于 1954 年）。俄罗斯也是第一个建造两座商用规模核电站的国家（建于 1963~64 年）。

俄罗斯 2010 年总发电量为 10380 亿千瓦时，其中 1700 亿千瓦时来自核电，占比 16.5%；燃气发电 5210 亿千瓦时，占比 50%；燃煤和水力分别发电 1650 亿千瓦时，占比 16%。

2012 年核电发电量约占总发电量的 18%。

俄罗斯最新的联邦目标计划（FTP）设想到 2030 年核电在电力总供给方面能占到 25%~30%，到 2050 年可以达到 45%~50%，而到本世纪末可达到 70%~80%。俄罗斯在建的核电厂有 10 座，总装机容量达 9160 兆瓦；计划建造的核电厂有 31 座，装机容量为 32780 兆瓦。为此，俄罗斯制定了细致的核电发展规划。

LeningradII-1 、 NovovoroniI-2 、 Rostov3 、 LeningradII-2、LeningradII-3、Seversk1、Tversk1、Rostov4、Nizgorod1、SouthUral1、Tversk2、Seversk2、Tsentral1 、 KolaII-1 、 LeningradII-4 、 Nizgorod2 、 SouthUral2、KolaII-2、KolaII-3、KolaII-4、Tversk3、Tversk4、SouthUral3、SouthUral4、Tsentral2、Nizgorod3、Primorsk1、Primorsk2。KLT-40S 是由俄罗斯 Afrikantov OKBM（阿夫里坎托夫机械工程实验设计局）设计的小型反应堆，基于该种堆型设计建造的罗蒙诺索夫号（Akademik Lomonosov）核电站于 2007 年在圣彼得堡开工建设，并已进入到施工最后阶段，预计将于 2014 年顺利竣工。该项目的完工将预示是世界首座浮动式小型核电站在商业领域的成功应用。KLT-40S 反应堆系统是对其标准核动力破冰船系统（KLT-40）进行设计改进后，尤其在安全系统方面有显著提升的浮动式发电机组。可以通过驳船的方式向没有集

中供电的边远地区居民供电和供热，并通过海水淡化系统为干旱地区提供电力和淡水。单个 KLT-40S 模块的热功率为 150MWt，并可以生产 35MWe 电力用于供电或进行海水淡化。KLT-40S 换料周期为 3~4 年，具备船上换料能力并设置有乏燃料贮存设施。KLT-40S 的堆芯采用了四环路的强迫循环方式进行冷却，并依靠对流进行应急冷却。

KLT-40S 的主要参数	
堆芯热功率	150MWt
燃料组件	UO <sub>2</sub> 硅铝合金六边形栅格排列
燃料富集度	18.6%
燃料组件数量	121 组
换料周期	3~4 年
设计寿命	40 年
维修周期	12 年

图1：KLT-40S的主要参数

## 法国

●法国有 75%的电力来自核能发电，其中 17%的用电是来自回收的核电燃料；

●法国拥有两台商运的快中子增殖反应堆，是世界上最多的；

●目前法国正在积极研究四代技术，并处于领先地位；

●法国是全球出口电力最大的国家。

由于非常低廉的发电成本，法国是全球出口电力最大的国家，每年从中收益超过 30 亿欧元。法国对发展核电技术方面非常的积极，其反应堆和燃料产品、服务都作为主

要的出口业务，此外基于长期的能源安全政策，法国有 75% 的电力来自核能发电，其中 17% 的用电是来自回收的核电燃料。法国建造了世界上第一台第三代反应堆。

2011 年法国发电 5420 亿千瓦时，总消费 4780 亿千瓦时——每人平均消费约 6800 千瓦时。在过去的 10 年里，法国每年出口约 700 亿千瓦时电量。法国有 58 个核反应堆由法国电力集团（EdF）在运作，总装机容量 63 吉瓦，每年供应约 4210 亿千瓦时的电量，占 2011 年总电量的 78%。2012 年法国总发电量为 5610 亿千瓦时，其中核电净产量为 4250 亿千瓦时、水电为 625 亿千瓦时、燃煤为 225 亿千瓦时、天然气发电 205 亿千瓦时、风电和光伏发电 195 亿千瓦时、生物质能 75 亿千瓦时。

## 法国的核电站主要建在哪？



图2：法国核电站分布图

## 法国核电机组主要机型有哪些？

法国核电机组（最先的两台来自美国西屋公司）目前全部都是 PWRs。

其中三种标准类型由阿海珐（AREVA）集团设计：  
3-loop900 兆瓦 34 台；4-loop1300 兆瓦 P4 类型 20 台；  
4-loop1450 兆瓦 N4 类型 4 台。

两台快中子反应堆：“凤凰（Phenix）”反应堆和“超级凤凰（SuperPhenix）”。

法国现开发完善的 900 兆瓦 PWR 机组已经出口多个国家：其中伊朗有 2 台，南非 2 台，韩国 2 台，以及中国 4 台。中国的 CPR-1000 机组设计就是基于法国的四台 M310 机组。

## 法国核电界最近在做什么？

2014 年 2 月法国电力集团投资 550 亿欧元来延长反应堆项目的寿命，大多将到 2025 年才能完成计划。其中包括花费 150 亿欧元来替换 58 台核电机组上的重型组件；福岛事件后，花费 100 亿欧元修改装置；用于抵抗外部突发事件而提高安全性所花费的 100 亿欧元。这里指出核反应堆里只有两块无法被替代——反应堆压力容器和安全壳。其余的组件通常寿命为 25~35 年，且需要修复和更换。

法国已经在研究三项第四代核反应堆型技术了：气冷快堆系统、液态钠冷却快堆系统、超高温气冷堆系统。阿

海珐集团正在积极的研究后两个系统，而在美国、南非和中国主要对超高温气冷堆系统有很高的兴趣。原子能委员会（CEA）对快堆系统的兴趣是基于他们只产生少量的废物且将能够更好地利用铀资源，其中包括 220000 吨贫化铀和一些再加工的储存铀。

### 韩国

- 韩国目前有 23 座核电站在使用，大约提供该国三分之一的电力；

- 韩国计划到 2022 年拥有超过 30 台核电机组；

- 目前韩国是国际核电市场较有竞争力的参与者。

核能在韩国仍然是一项发展战略的重点，到 2022 年装机容量预计增长 59%，达到 32.9 吉瓦（20.2 吉瓦是目前运行的核电站装机容量，6.7 吉瓦是在建核电站装机容量，剩余 6 吉瓦是计划建设的核电装机），并且到 2035 年维持这个水平。韩国目前有 23 座核电站在使用，总装机容量为 20.7 吉瓦，大约提供全国 1/3 的用电量。到 2022 年，韩国希望能够有超过 30 个核电机组，且发电量能达到全国用电量的一半。

2012 年韩国发电总量为 5310 亿千瓦时，其中 2230 亿千瓦时来自燃煤发电，1550 亿千瓦时来自核电（占比 29%），1210 亿千瓦时来自天然气，220 亿千瓦时来自燃油，60 亿千瓦时来自水电。2012 年底，燃煤发电装机容量为 24.5

吉瓦，天然气发电装机容量为 20.7 吉瓦，核电装机为 20.7 吉瓦，燃油发电装机为 7.1 吉瓦，水电装机容量为 6.4 吉瓦，可再生能源发电 2.3 吉瓦，总装机容量为 81.8 吉瓦，预计到 2022 年总装机容量可达到 101 吉瓦。

## 韩国在建和计划建设核电站有哪些？

韩国目前在建的核电站总装机容量为 6870 兆瓦（共五台机组），计划建造六台机组，装机容量为 8730 兆瓦。

项目	机型	装机容量(兆瓦)
新月城核电站 2 号机组	OPR-1000	1050
新古里核电站 3、4 号机组	APR1400	1455
新蔚珍核电站 1、2 号机组	APR1400	1455
新古里核电站 5、6 号机组	APR1400	1455
新蔚珍核电站 3、4 号机组	APR1400	1455
新古里核电站 7、8 号机组	APR1400	1455

图 3：韩国核电站建设计划一览

### 韩国核电走出去情况

韩国作为全球主要使用核电的国家，积极地出口核电技术，它是第一个在阿联酋(UAE)获得建造核电站的国家，并将建造并运营四座反应堆（其中包括韩国的 APR-1400 堆型），赢得价值 200 亿美元合同。

韩国在采用西屋公司（Westinghouse）和阿海珐集团的技术用于最先的八台 PWR 机组和燃烧工程公司（CombustionEngineering）的两台机组之后，韩国也开发了自主化核电技术标准——韩国标准核电厂（KSNP），并且逐步升级为 KSNP+堆型。2005 年 KSNP/KSNP+被改名为 OPR-1000（OptimisedPowerReactor），其主要针对亚洲市

场，尤其是印度尼西亚和越南，目前韩国有六座运行中和四座在建的反应堆是 OPR-1000 堆型。

### 东盟

在当前全球核能复苏、国际竞争日益激烈的形势下，东盟核电市场尤为引人注目，俄罗斯、法国、韩国、日本等国已经将核电出口目标瞄准东盟国家。

当前东盟各国经济迅猛发展与电力紧缺的矛盾日益严重，越南、印度尼西亚、泰国、马来西亚等已将发展核电作为未来能源发展重要选择，并着手制定具体的核电发展计划。

#### 泰国：将选出 3 个可行厂址

泰国电力装机容量约为 3240 万千瓦(2012 年)，其中天然气发电占比 60%以上。因专家预计该国天然气资源将在 15~20 年用尽，为了确保能源安全，降低对天然气的依赖，泰国准备推进核能利用。

泰国正在组织开展核电基础结构开发、厂址调查与环境影响评价、核电厂可行性研究、制定人力资源开发计划、加强公共交流与参与等工作。泰国电力局已经委托相关机构开展了核电厂址与环境评价，并选出 UbonRatchathani、NakhonSawan、Trad、Suratthani、Chumporn 等 5 个候选厂址，接下来将开展详细的环境和工程研究，从中选出 3 个可行厂址。

泰国目前有一座研究堆在运行，另外还有一座正在建造。

### 印尼：2020年将建成大功率核电站

印尼目前暂没有运行的核电站，印尼政府曾在2011年3月日本大地震事件后，高调表示继续推动核电在印尼的发展，并公布了印尼首个核电站项目。根据计划，印尼政府将在2025年前投资80亿美元建设4台共6000兆瓦的核电站。但是这个计划已经遭受该国一些环保主义者和政治家的强烈反对。他们认为，作为一个位于地震带上的岛国，印尼发展核电面临太大的风险。支持者认为，印尼将建设的核电站将采用最先进的技术，不应因福岛那种落后的核电站出现事故而放弃发展核电。

### 越南：2030年核电装机将达到1.5万兆瓦

越南很早就开始了核能利用的准备工作。早在2006年，越南政府就出台了和平利用核能战略，计划在2017年~2020年建成首座核电站并运行发电。

2007年，越南政府将首座核电厂的建成时间提前到了2015年。同年6月，越南政府公布《原子能法》草案。2009年11月，建造核电站的提案正式提交越南国会。

2010年，越南政府批准了《至2030年越南核电发展指导规划》，其中计划在越南宁顺、平定、富安、河静、广义5省建设8座核电站，每座核电站安装4~6台核电机组，

核电总功率在 2025 年将达 8000 兆瓦，2030 年将增至 1.5 万兆瓦，占越南发电总功率的 10%。根据规划，越南首个功率为 1000 兆瓦的核电机组将于 2020 年投入运行，而到 2030 年，越南全国将有 13 台核电机组投入运行。

### 马来西亚：将投运两座百万千瓦核电站

近年来马来西亚经济发展顺利，为满足电力需求，实现 2020 年成为发达国家目标，2010 年 10 月，核能作为能源领域的 12 个重点启动项目之一，被列入马来西亚国家“经济转型计划”，其中准备建造两座 100 万千瓦的核电站，并计划于 2021 和 2022 年投运。2011 年 1 月，政府根据 IAEA 建议，成立了核能计划实施机构——马来西亚核电公司。马来西亚已经完成了核电建设初步可行性研究，以及厂址初选与评定。

马来西亚有一座 1 兆瓦研究堆 (TRIGA)，由马来西亚核机构 (其前身为马来西亚核技术研究院) 负责运行。马来西亚核机构是一个技术支持机构，隶属于马来西亚科学、技术与创新部。

### 巴西

● 巴西已运行两座核电站，因为巴西得天独厚的水电资源，核电的经济效益并不凸显；

● 巴西是唯一一个作为非核武器国家，却让军队向民用核项目租赁铀浓缩技术的国家；

●巴西也是唯一一个非核武器国家却发展核动力潜艇的国家。

巴西目前有两座核电站在运行，提供的电量占总用电量的3%。2011年巴西全国产电量为5320亿千瓦时，其中包括4280亿千瓦时的水电，250亿千瓦时的天然气发电，320亿千瓦时的生物质发电，157亿千瓦时的核电，125亿千瓦时的燃煤发电，148亿千瓦时的燃油发电，以及32.6亿千瓦时的风电和光伏发电，此外，进口的发电量约有420亿千瓦时。巴西人均用电量从1990年的1500千瓦时/年增长到2011年的2700千瓦时/年。

巴西约有40%的电量是由巴西电力公司(Eletrôbrás System)生产，20%的电量是由国营企业生产，剩下的是由私人企业生产。目前巴西所有的核电站的运行和建造都是由巴西核电公司(Eletronuclear)在管理。巴西目前还没有私有核电站被建造或者运行。

### 水电之国的核电站经济性如何？

从经济的角度来考虑，巴西已运行的两座核电站——Angra1和Angra2的电价为75美元/兆瓦时（约人民币0.47元/度），比水电要贵1.5倍，而即将建成的Angra3机组的电价将比老水电多两倍还多，几乎和燃煤发电同价，但比天然气发电便宜。

2008年12月，Eletronuclear与法国阿海珐集团签订

工业合作协议，确定由阿海珐来完成巴西第三座核电站 Angra3 的建设，并对以后开发的核电站提供帮助。阿海珐也与 Angra1 核电站签下了服务契约。2010 年 12 月，巴西国家发展银行（BNDES）向 Angra3 投资 36 亿美元，占项目总成本约 60%。2012 年 12 月，巴西国营联邦储蓄银行同意向巴西电力公司借款 18.6 亿美元来完成该项目。目前该项目估计的建设成本为 75.9 亿美元。

2013 年 11 月，Angra3 获得阿海珐一份价值 17 亿美元的合同，其中包括对工程技术和零件的维护、数字测控、机组安装工作的监控和试运等工作。机组安装契约由两个巴西财团竞标获得。其中一个机电系统装配与机组主系统相关联，价值约 6.4 亿美元，另外一个为次级工作，价值约 8.16 亿美元。两项工作均在 2014 年 2 月获批。到 2013 年底，Angra3 机组建造已完成一半。

2013 年初，除了正在建造的机型为 PWR 装机容量为 1405 兆瓦的 Angra3，Eletronuclear 计划建造的两座核电站也终于被确定。

地理位置	机型	装机容量(兆瓦)
东北地区,伯南布哥	PWR×4	6000~6600
东南地区,米纳斯吉拉斯	PWR×4	4000~6000

图4：巴西核电站建设计划

## 阿根廷

- 阿根廷是拉美地区第一个利用核能发电的国家；

● 拥有 200 个核设施，其中有 6 座研究堆及同位素生产堆、3 座核电站；

● 2013 年阿根廷政府决定建设第四座核电站。

2011 年，阿根廷发电总量为 1300 亿千瓦时，其中天然气发电 666 亿千瓦时，水电发电 319 亿千瓦时，燃油发电 196 亿千瓦时，燃煤发电 33 亿千瓦时，核能发电 63.7 亿千瓦时。而到 2012 年，阿根廷核能发电降低到 59 亿千瓦时，只占全国发电量的 4.7%，比之前的几年都低。

阿根廷政府计划当计划的核电站都投产后，核能发电能占到总电量的 15%~18%。然而 2013 年预计向核电投资 420 亿美元的资金，到 2013 年中期也才使用 15%。阿根廷的发电企业大多都是私有化企业，由国家电力监管委员会（ENRE）监管，其总装机电功率可达 35 吉瓦，其中大约有 11%是自供和私人发电。

## 阿根廷现有的核电站有哪些？

项目	建造地点	机型	装机容量(兆瓦)
阿图查 1 号	布宜诺斯艾利斯	GE 重水堆	335
恩巴尔塞	科尔多瓦	Candu-6	600
阿图查 2 号	布宜诺斯艾利斯	GE 重水堆	692

图5：阿根廷现有核电站情况

### 阿根廷的核电发展计划是什么？

CAREM 小堆核电项目国际招标将于 2014 年下半年进行，2014 年年底前签署合同。

第四座核电站项目 2013 年阿根廷政府决定建设第四座核电站，包括两台不同堆型机组。第一台机组采用 CANDU 重水堆技术，延续其国内已有的核电技术，稳定现有的核电建设队伍；第二台机组采用压水堆技术，符合国际核电发展主流。

重水堆是以重水作慢化剂的反应堆，可以直接利用天然铀作为核燃料。

CANDU 型堆为加拿大坎杜公司研发的重水堆型，特点是堆心使用压力管(代替压水堆的压力容器)，用重水作为慢化剂和冷却剂，以天然铀作燃料，采用不停堆更换燃料。在技术经济上可与轻水堆竞争。

## 核电站怎样利用大数据？

编译：工业和信息化部国际经济技术合作中心 白旻

得益于信息技术的发展，越来越多机器部件的健康和性能可以在操作过程中被监控。利用此类传感器生成的大量数据，不仅需要复杂的计算，还需要大量的行业经验。美国电力研究院（EPRI）实施了一个新的示范项目，旨在将二者结合起来。

诊断核电站的潜在问题需要耗费大量的时间和资源。虽然大量的数据现在可以通过在线监测系统和其他工况评估设备来获得，但从中区分优劣并发现危急或突发的问题并非一件易事。

EPRI 正在开发一个预测和健康管理软件工具，用以支持核电站实现以上目标。比如，一个泵或马达轴承的异常高温读数可以作为设备问题的第一征兆，但如果问题被及时纠正，广泛的破坏就可以被避免。软件自动识别高温读数并提醒用户，列出引发工况的可能的的问题。然后，软件从用户那里获得其他信息来确定哪些问题需要改正。

### 全方位预测与健康管理的（FW-PHM）工具

被称作全方位预测与健康管理的（FW-PHM）的软件工具，通过集成大量技术来加强监测，包括在线先进识别模式、自动诊断，以及剩余使用寿命（RUL）算法。2013年，该软件

工具在几家核电站进行了试点测试，并证明它可以缩短诊断问题的时间，并使得系统工程师能将精力集中在解决问题上。完整的软件包在今年上半年将被更广泛地使用。

监测技术，像 FW-PHM 软件使用的系统，处于先进工业管理信息系统的前沿。建立在所谓的“大数据”分析的基础上，工业监测技术自动提供核电站人员可用以提高核电站的可靠性、效率和生产力的信息。

过去三十年工业和经济生产率的提升，都是基于数字信息和控制技术的开发和应用。随着核核电站的老化，核电工业在采用这些技术时表现缓慢。其目前的商业模式和硬件设施是上世纪 80 年代的，如果行业不采取高效率的商业模式，则很难跟上竞争者的步伐。监测技术已具有较高的成本效益，拖延采用可能会增加运行成本并限制核电站的长期经济可行性。

FW-PHM 软件套装使得核电站人员对操作和维护设备作出更明智的决定。它能够：

- 减少设备故障

工厂人员可以预见和避免可能会限制核电站生产或缩短设备生命的设备问题。

- 提高可靠性和工作效率

这个工具帮助核电站开发了可以一直使用，直到故障能够被补救的故障检修计划。由于它帮助指导故障检修过

程，当新的信息出现时，这个工具会持续提问，帮助核电站工程师决定下一个要搜集的最重要的信息是什么。

- 创建一个更加正式的行业范围的诊断经验记录

当系统性的原因被确定时，核电站可以改变他们的反应，这样问题就不会复发。

- 拓展知识

每次使用时系统都在通过持续的数据库开发进行“学习”。尽管每个核电站或公用事业公司都有自己的监测中心，EPRI 将从核电站的经验中收集新的故障检修信息，进行编译后，再提供给所有使用者。

- 促进核电站健康

通过获取经验丰富的工程师的知识——他们中的许多人几十年来一直在安全、可靠地运行着核电站，并且可能正考虑离开劳动力队伍，工具能整合核电站员工的知识 and 经验，帮助提供持续的设备健康管理。

### 现有技术的局限性

有许多行业中，已经有了很好的先例：因为提供及时纠正或预防维护的监测信息，避免了生产损失或灾难性的事故。对于核电站的应用，工程性的努力来评估异常情况并提供一个对真实老化状况的有用诊断，已经成为在扩大技术应用中的一个障碍。EPRI 承认，在工程进入该过程前，

需要一个自动诊断和预后顾问来捕捉异常现象并即刻提供诊断信息。

此外，大多数核电站没有一个自动学习的架构来捕捉获得的经验，同时检修故障，然后解决问题。由此带来的结果是，一些行业的问题，经历一次又一次同样漫长的诊断过程。

提供一个风险告知，保持有益的使用寿命估计，将使得核电站优先考虑维护活动。如果适当实现自动化，这种能力将填补在需要及时和准确的性能分析与核电站工程资源的可用性之间的差距。工程焦点将从认同潜在问题，诊断资产故障和提供维护指导向准确解决问题上转移。宝贵的运营资产可以避免过早或不合时宜的失败，或避免生命极限运行模式。

### 软件是如何工作的

FW-PHM 软件套装是建立在四个核心模块基础上的：

- 诊断顾问通过使用运行数据比较设备故障特征来确定即将发生的故障；
- 设备故障特征数据库从跨行业的每一项资产类型中搜集和组织设备故障特征；
- 剩余寿命顾问提供关于一个老化或故障设备能提供多长时间的可靠服务的风险告知估计；

- 剩余使用寿命 (RUL) 数据库组织跨产业搜集的设备剩余寿命特征。

软件集成了来自在线监测、趋势和其他核电站过程数据的不同信息，包括先进模式识别 (APR)。这项技术是由美国能源部 (DOE) 和美国航空航天局 (NASA) 在上世纪 90 年代开发的。商业化的先进模式识别产品在航空、电力、信息技术及其他行业得到了广泛应用。该技术适用于对组件和对设备性能敏感的核电站参数的持续监测。

先进模式识别系统学习代表系统或设备健康状态的行为模式。当偏离正常模式时，系统作为潜在下降指标报告异常。这些异常必须加以分析，以诊断特殊问题。

EPRI 的 FW-PHM 工具包含一个诊断顾问，它使用异常触发器，依据代表设备特别故障模式的故障特征数据库来自动匹配被监测设备的条件。诊断顾问提供一个匹配当前条件的可能故障模式的排名顺序，同时，建议能够改善诊断的额外信息。

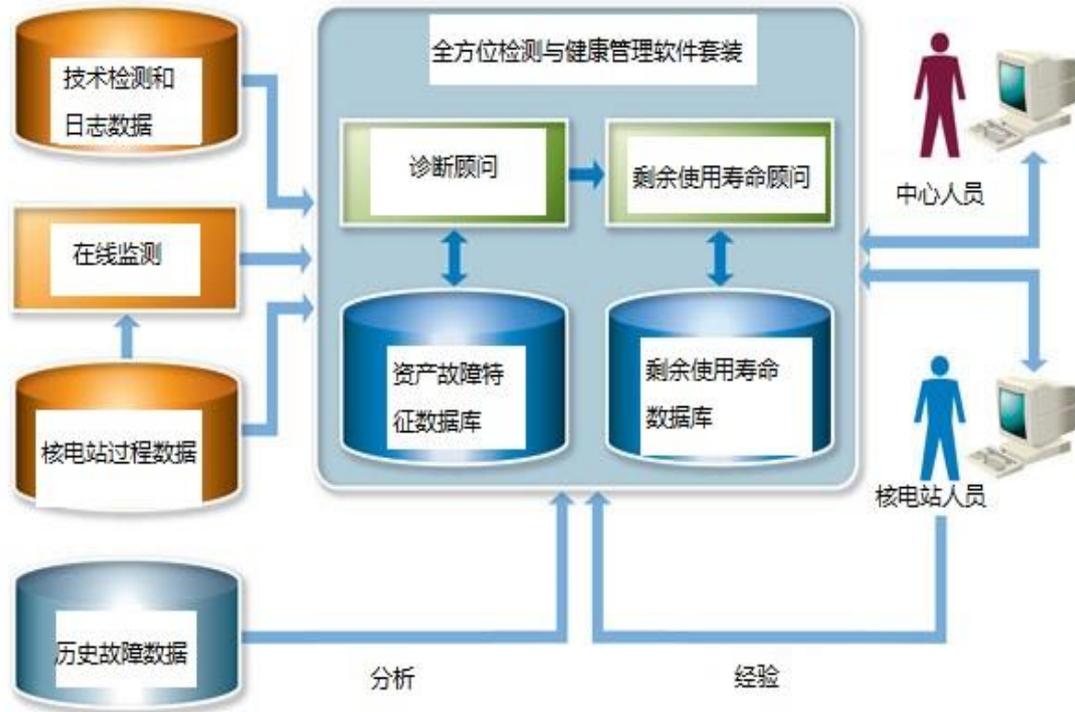


图 1:FW-PHM 组件信息关系的原理图

EPRI 将保持提供搜集和检索产业数据的一个通用格式的两个数据库模块，这样故障特征和剩余寿命模式就能够在能源产业中被跨行业使用了。这一点很关键，因为这不像是单独的核电站或设备，在设备的寿命期内将经历故障频发和趋于老化的过程。用户可以实时访问设备健康管理的广泛的行业经验而无需消耗自己的资源。

FW-PHM 特征数据库被用来记录资产故障特征和剩余寿命特征。用户（最终使用者）安装的特征数据库包含两个模式。一个模式包含由 EPRI 创建的保留主记录的主表。另一个模式包含保留用户创建的记录的用户表。这个构架使得 EPRI 能为终端用户提供定期更新的主数据库。

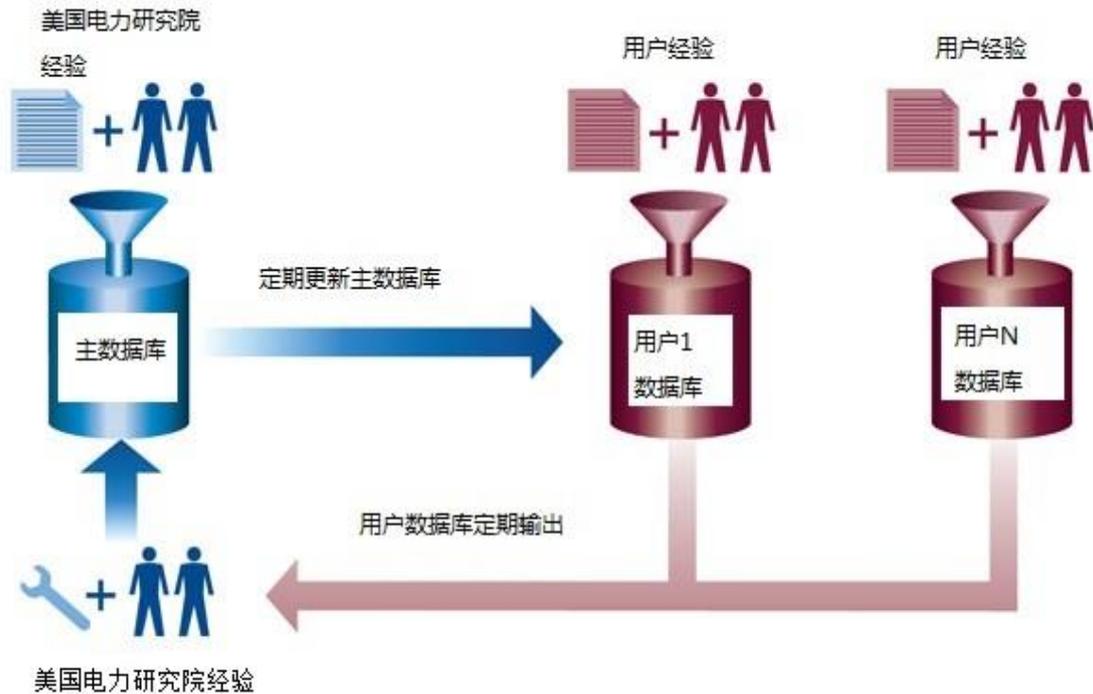


图 2: EPRI 签名数据库更新的架构

FW-PHM 软件套装是一个基于互联网的企业级工具，特别为与电力设施信息技术和业务流程相兼容和集成而设计。软件设计易于适应每个核电站间不同的设备命名习惯，信息来源和管理流程，但可以被整合到一个授权用户的综合的、全方位的视角下。

当新设备故障条件和运行寿命信息被用户发现和记录时，软件也设计为一个随着时间推移而提高的学习应用程序。数据库模块组织新信息并允许其被恢复和使用。

### 产业示范项目和技术转让

FW-PHM 软件套装处于贝塔安装和调试的最终阶段。贝塔调试阶段是美国能源部轻水反应堆可持续发展项目（LWRS）和几个产业应用示范项目合作进行的。安装、调

试和运营是由美国能源部爱达荷国家实验室（INL）、艾斯能（Exelon）、杜克能源（Duke Energy）、法国电力研究部（EDF Research）以及鲁米那特（Luminant）完成的。

三座主核电站聚焦独立的应用组件，来测试软件工具的功能，其中包括艾斯能布雷德伍德核电站的紧急柴油发电机、杜克能源希伦哈里斯核电站的发电机升压变压器，以及鲁米那特公司科曼奇峰核电站的一台卧式泵。

选取这些示范项目是因为加入的核电站具有发展良好的 APR 监测基础设施，并具有已经开发出较强监测能力的设施，所有核电站的管理和设备都可以为这个项目提供支持。

布雷德伍德核电站的紧急柴油发电机配备了数字日志记录平台，并由 APR 模型监测。来自布雷德伍德核电站的工程师与艾斯能公司的核电监测项目经理，以及 EPRI 和爱达荷国家实验室（INL）共同将 FW-PHM 系统应用于发电机。故障记录已经开发出了许多常见系统故障的模式。

希伦哈里斯核电站的发电机升压变压器配备了功能完备的数字监测平台来提供实时运行数据。杜克能源公司的 SmartGen M&D 监测中心开发出了 APR 模型来监测变压器，并且与 EPRI 共同将 FW-PHM 系统应用于变压器的故障特征。

EPRI 和可靠性工程人员在科曼奇高峰核电站安装了 FW-PHM 软件套装，并且正在为加热器疏水泵和电机组合开

发一个示范应用。组件专家将与 EPRI 共同开发包含在数据库中故障特征。项目组计划在鲁米那特性能优化中心安装软件套装，并持续应用和开发高价值设备的故障特征。

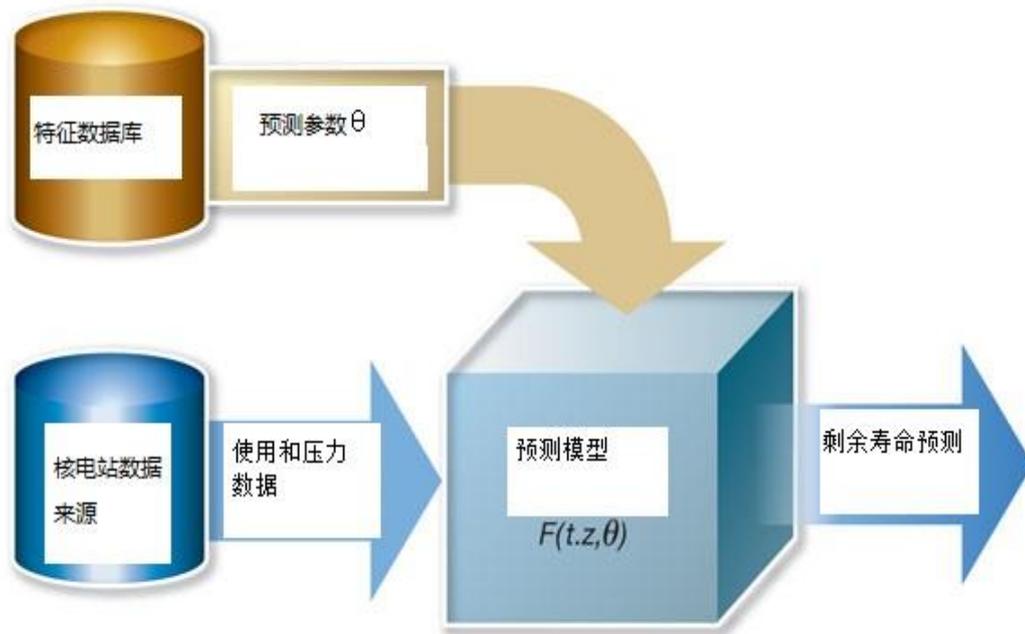


图 3: 示意图的方法计算剩余寿命估计

爱达荷国家实验室（INL）的科学家及轻水反应堆可持续发展（LWRS）项目与 EPRI 已经开始进行贝塔测试，开发故障特征支持试点应用，测试诊断顾问，开发剩余使用寿命（RUL）模型。

2013 年秋季，诊断顾问在爱达荷国家实验室正式演示。已知的故障模型被嵌入示范核电站的运行数据，测试有效性。

2014 年，EPRI 重点是推进最终的软件开发和技术转让。FW-PHM 软件的生产版本计划于 2014 年中期进行商业发布。同时，将开发故障特征数据库，并且于 2014 年得到广泛应

用，主要集中于广泛的电力行业应用设备，包括电站变压器、紧急柴油发电机、主发电机、卧式或立式水泵和电机、汽轮机给水泵、阀门和燃气轮机。这些特征将形成生产的基础，2014年底将发布主故障特征数据库。

2015年，EPRI将专注于技术转让和对用户的支持。EPRI还将专注于开发和管理故障特征数据库，研究剩余使用寿命（RUL）能力，并扩展在固定资产上的应用，支持运行超过60年的核电站。

爱达荷国家实验室将持续开发发电机升压变压器故障特征，并倚靠诊断顾问测试它们。新的研究将为普通升压变压器开发剩余使用寿命（RUL）模型，紧随其后的是剩余使用寿命（RUL）顾问描述，利用在正常变压器运行数据中嵌入故障模型。

（译自：2014年5月21日【美国】<http://www.neimagazine.com>）

## 全球能源资源环境研究所简介

全球能源资源环境研究所是工业和信息化部国际经济技术合作中心下属的专门从事工业和通信业节能环保问题研究的咨询服务机构，以能源节约、资源综合利用、污染控制、清洁生产等与工业和通信业发展相关的环保问题为主要研究方向。按照我中心的战略部署和工作安排，全球能源资源环境研究所主要从事以下工作：为工业和信息化部节能环保规划、政策和标准等的制定及相关决策提供支撑；追踪研究国内外绿色工业、绿色通信业发展的最新动态及相关变化；向各级政府、行业组织、社会团体、企业事业单位提供与工业、通信业节能环保问题相关的咨询、研究和顾问服务；开展与工业和通信业绿色发展相关的科研和交流活动。

**工业和信息化部国际经济技术合作中心**  
**中国国际贸易促进委员会电子信息行业分会**

北京市海淀区万寿路 27 号院 8 号楼 9 层（100846）

编辑：毛涛/白旻/金逸

联系人：毛涛/白旻

电话：86-10-6820-7158/ 6820-0638

邮箱：maotao@ccpitecc.com/baimin@ccpitecc.com

网址：<http://www.ccpitecc.com/>