

核能经济学：最新研究进展

史蒂夫·托马斯



海因里希·伯尔基金会
生态主题出版物系列

核能经济学： 最新研究进展

史蒂夫·托马斯，2010 年 3 月
海因里希·伯尔基金会编辑



GREEN EUROPEAN FOUNDATION

为本书出版提供了支持

HEINRICH BÖLL STIFTUNG

海因里希·伯尔基金会

核能经济学：最新进展

The Economics of Nuclear Power: An Update

版权

© 本书作者 和 海因里希·伯尔基金会

封面图片来源：iStockphoto.com© 版权所有 Björn Kindler

本书第 4 到 7 章中的图片已获得知识共享授权，保留部分版权。

详见 <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>

出版

海因里希·伯尔基金会 中国办公室

2011 年 5 月印刷

索取请联系：

海因里希·伯尔基金会 中国办公室

地址：中国北京市东城区工体北路新中西街 8 号亚洲大酒店写字楼 309 室

电话：(+86) 10 66154615

传真：(+86) 10 66154615 转 102

电子邮件：info@boell-china.org

网址：www.boell-china.org

本书可在 www.boell-china.org 下载

英文原版可在 <http://boell.eu/web/288-663.html> 下载

本书译自英文，若有疑义，请参照英文原版

协调与定稿

陈冀俚

翻译

关晓宇

校对

苗 红

目录

序言：核能 - 注定是末路一条 5

作者注 7

前言

1. 全球核电站市场:现有订单和前景 9

2. 核经济的决定性因素 16

2.1 核电站的建造成本和时间 17

2.1.1 数据的不可靠性 17

2.1.2 难以预测性 18

2.1.3 学习效应、规模经济和技术进步 19

2.1.4 建造时间 20

2.2 资本成本 21

2.3 运营性能 23

2.4 非燃料运营成本和维护成本 24

2.5 核燃料成本 25

2.6 核电站的会计使用寿命 26

2.7 核电站退役和处理成本与资金储备 27

2.8 保险和责任 27

3. 奥尔基洛托和弗拉芒维勒核电站的经验 29

3.1 奥尔基洛托核电站 29

3.2 弗拉芒维勒核电站 30

4. 美国的规划 32

4.1 可能的结果 35

5. 英国的规划 38

5.1 可能的结果 39

6. 德国 41

7. 其他市场 43

7.1 阿拉伯联合酋长国 43

7.2 南非 44

7.3 加拿大 45

7.4 土耳其 46

7.5 意大利 46

7.6 巴西 46

7.7 东欧国家 47

7.7.1 斯洛伐克共和国 47

7.7.2 罗马尼亚 47

7.7.3 保加利亚 48

7.7.4 其他国家 48

8. 电力公司在核电站建造中的成本预算 49

8.1 美国 49

8.2 其他国家 50

8.3 总结 50

9. 政府补贴的必要性和补贴程度 52

结论 54

附录	57
附录 1 核反应堆技术	57
附录 2 现有设计方案和供应商	64
附录 3 退役	65
附录 4 美国核电项目现状	68

序言：核能 – 注定是末路一条

假如我们经常关注有关核能复兴的相关言论，可能就会形成这样一种印象：新建的核电站的数量正在稳步快速地增加。但是事实上，最新的统计数据显示，目前在建的60座核电站，主要在中国，其余的在俄罗斯、印度、韩国和日本，在美国仅有一座。而且，在《VGB 电力科技》（VGB Power Tech）杂志的名录中还包括了大量无法完成的老核电站项目，现在已然成了建筑废墟。

而且，从目前来看，到2020年全世界大约有160个新建核电站的项目申请，其中有53个来自中国，35个来自美国，其次就是韩国和俄罗斯。在欧洲，英国新建核电站的项目申请最多，有8个，接下来依次是意大利、瑞士、芬兰、罗马尼亚和立陶宛。而在全世界范围内宣传核电站建设的法国，在本土仅计划新建一座核电站。绝大多数欧洲国家目前没有任何具体的新建核电站计划。

事实上，在世界范围内，核电站的数量一直在减少。目前仍在运转的核反应堆有436个。在接下来的15–25年内，一些新的核电站会投入生产，但更多数量的老旧核电站会停止运营。并且，不是所有计划中的新建核电站都能最终建成，得以运营。因为能源市场对自由竞争的开放程度越高，发展核能的机会就会越小。

同时，建设新核电站的成本也在激增。比如，在芬兰奥尔基洛托新建的核电站，尽管核电站的骨架还没完成，但建设成本已经从30亿欧元增加到了54亿欧元左右。此外，核电站的核废料处理问题仍未解决，技术失败的风险也较高。目前，如果没有政府的财政补贴和担保，私营能

源企业集团是不会冒险去投资新的核电站建设的。值得注意的是，在政府和能源产业联系紧密的地方更容易兴建新的核电站。

迄今为止，核电站的建设都享受着巨额的国家补贴。在德国，相关的国家补贴累计超过了1000亿欧元，而且目前这些优惠政策仍在继续执行中。如此一来，数以十亿欧元的用于处理核废料和核电站拆撤的预留款为企业实现免税提供了可乘之机。此外，核电站运营者的负债义务只有25亿欧元——这仅占一次中型核意外事故处理成本的一小部分。从整体来看，核能利用由于其危险性使得实际使用成本非常高。

除了有关核能的常见争论，现在又出现了一些新的问题。首先，核扩散的危险性会随着世界范围内新建核电站的增多而增加。尽管国际原子能总署（IAEA）在核能管理方面做出了努力，但是核能技术在民用和军用领域的界限仍然很难严格区分开来。最近出现的伊朗核问题就是一个很好的例子。其结论就是，对于那些不想遵循核不扩散条约规定的国家，我们是无计可施的。伴随着核能的扩张，为了生产核燃料，需要建设更多的核燃料后处理工厂和快中子增殖反应堆。这两者都会增加钚的流通，进而产生大量可用于制造核武器的可裂变材料——这是多么可怕的情景！

其次，延长现有核电站的使用寿命，甚至建设新的核电站，将会成为发展可持续性能源的巨大障碍。那些认为核能与可持续性能源互补的说法都是站不住脚的。因为，这两者不仅会为了非常有限的投资和输电线路而彼此竞争，而且核电站因其

僵化的持续运作模式会抑制可再生能源尤其是风能的发展潜力。在风能资源很充裕并且低能耗用电方式得到普及的国家，例如德国，它的能源需求已经可以在很大程度上依靠风能发电解决。如果出于短期的经济考虑，不降低现存核电站（也包括大型燃煤电站）的发电量，则剩余电量就不得不以亏本的价格出口到其他国家。这是一种多么疯狂的行为。

不论你如何看待它，核能既不会对气候变化产生决定性的贡献，也不是确保能源供应的必然选择。事实恰恰相反，那些希望通过发展可再生能源以100%满足电力需求的人们应该反对建设新的核电站，而且反对延长现存核电站的使用寿命。尽管仍有支持核能的声音，但核能并不是人类步入太阳能时代合适的中间过渡阶段。

拉尔夫·弗于克斯 Ralf Fücks
海因里希·伯尔基金会（Heinrich-Böll-Stiftung）主席
2010年1月，柏林

作者注

本文完成于2010年3月，截稿之后又有一些核电站开始动工建设，也有一些核电站建造完成。下表显示了7座在2010年3月到2010年8月末这个时间段内开始动工建设的核电站。另外，始建于1976年的巴西昂哥拉（Angra）3号核电站的建设工作也重新启动了（关于这个核电站的详细情况请见表3）。另有4台核电机组建造完成（详见表2），分别是拉贾斯坦（Rajasthan）6号（印度）、临高3

号和秦山2号、3号（中国）以及新古里（Shin Kori）1号（韩国）。综上所述，截至2010年8月，全世界共有59座在建核反应堆，其中有37座是在2005年以后才开始建造的。在这37座反应堆中，中国23座、俄罗斯6座、韩国5座、日本2座，法国1座。新的核电建设订单依然主要来自于少数几个国家，而且这些国家基本都选用国内的供应商，而且使用相对较旧的核反应堆设计方案。

表 2010年3月至2010年8月期间新建的核反应堆

国家	地址	反应堆类型	供应商	产能（兆瓦）
中国	台山2号	PWR	阿海珐	1700
中国	昌江1号	PWR	中国	1000
中国	海阳2号	PWR	中国	1000
中国	防城港1号	PWR	中国	1000
日本	大间（Ohma）	BWR	东芝	1325
俄罗斯	列宁格勒（Leningrad）二期2号	PWR	俄罗斯	1080
俄罗斯	罗斯托夫（Rostov）4号	PWR	俄罗斯	1080

来源：PRIS 数据库，<http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>

前言

温室气体减排问题给人类社会带来了严峻的挑战，特别是在发电领域，这也重新引发了各国建设核电站的兴趣。首先替换一部分已有的老化反应堆，然后用核电逐步满足电力需求的增长，并最终取代一部分化石燃料发电站。那些从未应用过核能的新兴市场也会逐步开始建设核电站。从长远来看，核电将有望取代化石燃料来满足某些特定的能源需求。例如，核电站可以用来生产氢气，以此来代替公路车辆所使用的碳氢化合物。

公众质疑核能究竟是不是一种廉价的能源，这种质疑是可以理解的。新建核电站的成本预算一直在以惊人的速率攀升。在过去的十年间，核电站建设预算增长了五倍。而且人们普遍认为，随着核电站设计的巩固完善，所需建设成本会进一步增加。近些年来，美国、英国、德国、意大利等国政府更是坚持维护现有核电站的运营，并重新开始订购核电站，因为他们

认为核电是对抗气候变化最经济划算的一种方式。公共电力公司决定尽量延长现有核电站的运营期，并对建设新核电站的需求给予了口头支持，但它们不愿在没有成本—市场担保及补贴的情况下建设新的核电站。这一明显自相矛盾的现象有一部分原因较容易解释，那就是核能的运营成本相对较低，而核能的总体成本包括建筑成本却非常高。因此，一旦核电站建成，则从核电站运营角度而言是经济可行的，但是与其他能源方式相比，核电站的总体成本，包括建设成本都相对较高。因为核电站的建设成本是“沉没”成本，已无法挽回，而利用核电站继续发电的边际成本则很小。

本报告的目的是确定影响核电成本的关键经济学参数及决定性因素。本报告的结论是，如果没有电力用户和纳税人的补助和担保，新的核电站是不可能建造起来的。



1. 全球核电站市场： 现有订单和前景

过去的十年间，关于“核能复兴”的说法越来越多，这基于两个因素。新一代核电站，即所谓的改良式第三代（Generation III+）设计，具有造价低、易建造、更加安全且生产废料少等特点（关于改良式第三代设计的描述见附录1）。核电站订购方不仅限于那些对发展核能没有问题的国家，例如法国、印度、韩国，也包括美国、英国、意大利、德国等那些似乎曾经不打算发展核能的¹国家。对于核工业来说，美国 and 英国是特别的目标国家，原因如下：

——比起欧洲和北美地区其他国家（芬兰和法国除外），英国和美国的核电建设项目更趋向于订购改良式第三代设计的核电站；

——英国和美国被视为核能的先驱国

家，因此，如果这两个国家有新的核电站订单，那么会带来额外的影响；

——从经济角度而言，过去英美利用核能的经历十分糟糕，以至于早在十年前就普遍认为英国不会再下核电建设的订单。所以英美市场的再次发展算得上是一次复兴。

从现有核电站订单可以看出，核能复兴大多
是空谈，而且有地理位置的局限性。

然而，从现有核电站订单（表2、表3、表4）可以看出，核能复兴大多是空谈，而且有地理位置的局限性。2010年1月，全世界正建的核电站一共有55座，总发电量为510亿瓦；正在运营的核电站有443座，总发电量为3750亿瓦（表1）。2005年后开始建造的32座核电站之中，除了一座在法国，一座在日本外，其余30座都是在中国、韩国和俄罗斯，其中中国20座，韩国6座，俄罗斯4座（表2）。除了

5座中国的核电站外，其余核电站都是由的本土供应商承建。西方供应商西屋电气公司(Westinghouse)和阿海珐核能公司(Areva NP)活跃于欧洲，但是除了中国的五个订单外，他们只获得了两个订单——即阿海珐公司的芬兰奥尔基洛托项目和法国的弗拉芒维勒项目。这七项订单加上2009年12月阿联酋从韩国订购的四座核电站订单是目前仅有的第三代或改良式第三代设计核电站建设订单。

最有可能的结果是中国将继续在国际市场上订购一些核订单，但数量会比中国政府和核工业界预计的少很多，同时它会尝试通过国内核电站的供应产业来加强自身的建设能力。

因此，如果没有中国，几乎没有新核电站的订购单。中国的大多数订单都由本土公司承建，而且都是基于1980年大亚湾核电站所采用的法国设计之上的。在已有15座新核电站开始建造的情况下，中国能否有足够的人力和财力继续按2008年和2009年的建造速率下订单，还要拭目以待。考虑到中国可能会谨慎地利用有限的财力资源，最有可能的结果是中国将继续在国际市场上订购一些核订单，但数量会比中国政府和核工业界预计的少很

多，同时它会尝试通过国内核电站的供应产业来加强自身的建设能力。中国目前自主供应的核电站设计过于陈旧，以至于不太可能与西方有关联。

俄罗斯和中国一样，有着野心勃勃的核能扩张计划。2008年，俄罗斯计划到2025年共有26台新核电机组(约30亿瓦)投入使用，然而2009年时，这一目标日期悄悄地改为了2030年¹。有4台机组始建于20世纪80年代，现在仍被归类为建设中的项目，然而它们处于这一状态已有十年了，甚至更长(见表3)。如果俄罗斯对新核能的需求迫切，并且财力资源充足，那这些核电站早就应该建成了。关于俄罗斯核电站建设状态难以获取可靠的信息，这些在建的核电站现在也许有些已经中断了。特别是库尔斯克(Kursk)5号核电站，所使用技术与切尔诺贝利(Chernobyl)核电站相同，它一旦投入使用，将引起很大的争议。

表 1 2010 年 1 月使用中的核电站和建设中的核电站

国家	使用中：发电量兆瓦(机组数量)	建设中：发电量兆瓦(核电机组数量)	核电占电能百分比(2008年)	所用技术 ²	供应商
阿根廷	935(2)	692(1)	6	HWR(重水反应堆)	西门子(Siemens)，加拿大原子能公司(AECL)
亚美尼亚	376(1)	—	39	WWER(水动力反应堆)	俄罗斯
比利时	5863(7)	—	54	PWR(压水反应堆)	法马通公司(Framatome)
巴西	1766(2)	—	3	PWR	西屋电气公司(Westinghouse)，西门子

1 原子核周刊，《俄罗斯新核反应堆建设延期》，2009年3月26日。
2 核电站技术概述见附录1。

国家	使用中：发电量 兆瓦(机组数量)	建设中：发电量 兆瓦(核电机组 数量)	核电占电 能百分比 (2008年)	所用技术 ²	供应商
保加利亚	1966(2)	1906(2)	33	WWER	俄罗斯
加拿大	12577(18)	—	15	HWR	加拿大原子能公司
中国大陆	8438(11)	19920(20)	2	PWR, HWR, WWER	法马通公司, 加拿大原子能公司, 中国, 俄罗斯
中国台湾	4949(6)	2600(2)	20	PWR, BWR(沸水反应堆)	通用电气(GE), 法马通公司
捷克共和国	3678(6)	—	32	WWER	俄罗斯
芬兰	2696(4)	1600(1)	30	WWER, BWR, PWR	俄罗斯, 瑞典通用电机公司(Asea), 西屋电气公司
法国	63260(59)	1700(1)	76	PWR	法马通公司
德国	20470(17)	—	28	PWR, BWR	西门子
匈牙利	1755(4)	—	37	WWER	俄罗斯
印度	3984(18)	2708(5)	2	HWR, FBR(快中子增殖反应堆), WWER	加拿大原子能公司, 印度, 俄罗斯
伊朗	—	915(1)	—	WWER	俄罗斯
	46823(53)	1325(1)	25	BWR, PWR	日立, 东芝, 三菱
韩国	17647(20)	6520(6)	36	PWR, HWR	西屋电气公司, 加拿大原子能公司, 韩国
墨西哥	1300(2)	—	4	BWR	通用电气
荷兰	482(1)	—	4	PWR	西门子
巴基斯坦	425(2)	300(1)	2	HWR, PWR	加拿大, 中国
罗马尼亚	1300(2)	—	18	HWR	加拿大原子能公司
俄罗斯	21743(31)	6894(9)	17	WWER, RBMK(石墨慢化沸水反应堆)	俄罗斯
斯洛伐克	1711(4)	810(2)	56	WWER	俄罗斯
斯洛文尼亚	666(1)	—	42	PWR	西屋电气公司
南非	1800(2)	—	5	PWR	法马通公司
西班牙	7450(8)	—	18	PWR, BWR	西屋电气公司, 通用电气, 西门子
瑞典	8958(10)	—	42	PWR, BWR	西屋电气公司, 瑞典通用电机公司
瑞士	3238(5)	—	39	PWR, BWR	西屋电气公司, 通用电气, 西门子
乌克兰	13107(15)	1900(2)	47	WWER	俄罗斯
英国	10097(19)	—	13	GCR(气冷反应堆), PWR	英国, 西屋电气公司
美国	100683(104)	1165(1)	20	PWR, BWR	西屋电气公司, 巴布科克-威尔科克斯公司(B&W), 卡利伯能源公司(CE), 通用电气
全球	375136(443)	50955(55)			

来源：国际原子能机构, <http://www.iaea.or.at/programmes/a2/>

20 世纪六七十年代，印度从西方供应商订购了几座核电站，但是1975 年，印度却使用加拿大研究反应堆生产的核材料进行了一次核武器试验，此事件切断了印度与西方核电建设供应商的全部联系。之后印度继续建造核电站，使用的是20 世纪六十年代向加拿大订购的设计方案。这些核电站可靠性很低，建造时间经常比预计的长，所以表2 中所标的完工日期可能并不十分准确。印度随后进行了多次的核武器试验，美国也于1998 年中断了与印度的合作。但是在2005 年，印度和美国谈判达成了一项关于民用核电的技术合作协议。加拿大也于2005 年恢复了对印

度的核材料销售。从此，俄罗斯原子能公司(Rosatom) (4 台WWER-1200 机组)、西屋电气公司 (8 台AP1000 机组)、阿海珐集团(Areva) (6 台EPR 机组) 以及通用电气- 日立 (6 台ABWR 机组) 都声称与印度签订了建造核电站的协议，但是没有一个是确定订货。印度国内核工业希望使用各类技术建设大量新的核电站，包括快中子反应堆、重水反应堆以及钍燃料核电站。印度政府设立了一项目标，即截止2032 年，投入使用的核电站总发电量达63000 兆瓦。考虑到印度核电发展的历史，如果印度最终能接近这一达成目标也将是十分令人吃惊的。

表 2 全球 1999 年之后订购的处于建设期的核电站

国家	地址	反应堆类型	供应商	产能 (兆瓦)	开建日期	完成情况 (%)	预计运营时间
中国	方家山 1 号	PWR(压水反应堆)	中国	1000	2008	0	—
中国	方家山 2 号		中国	1000	2009	0	—
中国	福清 1 号		中国	1000	2008	0	—
中国	福清 2 号		中国	1000	2009	0	—
中国	海阳 1 号	PWR	中国	1000	2009	0	—
中国	红沿河 1 号	PWR	中国	1000	2007	20	—
中国	红沿河 2 号	PWR	中国	1000	2008	0	—
中国	红沿河 3 号	PWR	中国	1000	2009	0	—
中国	红沿河 4 号	PWR	中国	1000	2009	0	—
中国	岭澳 3 号	PWR	中国	1000	2005	60	2010
中国	岭澳 4 号	PWR	中国	1000	2006	50	2010
中国	宁德 1 号	PWR	中国	1000	2008	10	—
中国	宁德 2 号	PWR	中国	1000	2008	5	—
中国	宁德 3 号	PWR	中国	1000	2010	5	—
中国	秦山二期 3 号	PWR	中国	610	2006	50	2010
中国	秦山二期 4 号	PWR	中国	610	2007	50	2011
中国	三门 1 号	PWR	西屋电气	1000	2009	10	—
中国	三门 2 号	PWR	西屋电气	1000	2009	10	—
中国	台山 1 号	PWR	阿海珐	1700	2009	0	—
中国	阳江 1 号	PWR	西屋电气	1000	2009	10	—
中国	阳江 2 号	PWR	西屋电气	1000	2009	0	—
中国台湾	龙门 1 号	ABWR(改良型沸水反应堆)	通用电气	1300	1999	57	2011
中国台湾	龙门 2 号			1300	1999	57	2012

国家	地址	反应堆类型	供应商	产能 (兆瓦)	开建日期	完成情况 (%)	预计运营时间
芬兰	奥尔基洛托 (Olkiluoto)3 号	EPR(欧 式 压 水 反 应 堆, 亦 称 渐 进 性 动 力 堆)	阿海珐	1600	2005	40	2012
法国	弗拉芒维尔 (Flamanville)3 号	EPR	阿海珐	1700	2007	25	2012
印度	卡伊格 (Kaiga)4 号	Candu(加 拿 大 重 水 铀 反 应 堆)	印度	202	2002	97	2010
印度	库坦库拉姆 (Kudankulam)1 号	WWER(水 动 力 反 应 堆)	俄罗斯	917	2002	90	2011
印度	库坦库拉姆 2 号	WWER	俄罗斯	917	2002	79	2011
印度	PFBR	FBR(快 中 子 增 殖 反 应 堆)	印度	470	2005	37	—
印度	拉贾斯坦邦 (Rajasthan)6 号	Candu	印度	202	2003	92	2010
日本	岛根 3 号	BWR(沸 水 反 应 堆)	东芝	1325	2007	57	2011
韩国	新谷里 1 号	PWR	韩国	960	2006	77	2010
韩国	新谷里 2 号	PWR	韩国	960	2007	77	2011
韩国	新谷里 3 号	PWR	韩国	1340	2008	29	2013
韩国	新谷里 4 号	PWR	韩国	1340	2009	29	2014
韩国	新月城 1 号	PWR	韩国	960	2007	49	2011
韩国	新月城 2 号	PWR	韩国	960	2008	49	2012
巴基斯坦	恰西玛 (Chasnupp)2 号	PWR	中国	300	2005	25	2011
俄罗斯	别洛亚尔斯克 (Beloyarsky)4 号	FBR	俄罗斯	750	2006	12	—
俄罗斯	列宁格勒 (Leningrad) 二期 1 号	WWER	俄罗斯	1085	2008	0	—
俄罗斯	新沃罗涅日 (Novovoronezh) 二期 1 号	WWER	俄罗斯	1085	2008	5	—
俄罗斯	新沃罗涅日二期 2 号	WWER	俄罗斯	1085	2009	0	—
总计				40778			—

来源：PRIS 数据库，<http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>；核子新闻，《全球核电站一览表》

注：只包含 100 兆瓦以上机组。施工阶段参考《核子新闻》2009 年 3 月报道。

韩国在过去的20年中一直在订购核电站，仅过去的四年就订购了5座，目前韩国36%的电能都来自核电（见表2）。目前在建的6台机组如果投产，这一数字将会升至50%，之后韩国的国内市场就会接近饱和，应该不会有更多的订单产生。这也促使韩国转向国外市场，以较低的报价赢得了阿联酋的4个核电站建设订单。

同样，另一个预期核电会有大幅增长的 国家就是日本，但实际上日本的订单并没有大幅增长。日本的公司使用由西屋电气和通用电气许可的技术进行核电站的设

计。在日本国内，要获得核电站选址建造许可可能需要长达20年的时间，不过一旦开始动工，通常都会很快就完成建设（通常为4年），不会延期。日本核电站发生过一系列事故，而且经常处理不当，这导致公众对核能的忧虑增加，而且在日本要选取更多可用于建设核电站的地点也是比较困难的。2010年初只有一座核电站正在建造（见表2），目前看来，将来日本的核电建设订单数量不会太多。

表3显示，1990年前开建而至今未完工的核电机组有17台，虽然还是计划要

建成使用，但实际上建设开展得并不积极。对于这些机组，表3中所标注的完成进度可能并不十分准确。表3中完成进度不足33%的电站基本上都还处于场地准备阶段，还没开始实际的反应堆建设。另外，中国台湾1996年订购的机组，当时预计会在2004年完工，但实际上却仍在建设中，已经延期八年了。美国田纳西的沃茨巴(Watts Bar)反应堆是一个非常有趣的例子。这两座反应堆1973年就开始动工了，然而工期却不断受阻。1号机组最终于1996年完工，造价超过60亿美元³，2号机组在1985年被迫终止建设，据说当时已完成了90%⁴。2号机组在2007年又重启开工，预计将于2013年完工，重启的工程造价为25亿美元。

像贝尔丰特和沃茨巴这样使用约40年前设计方案的核电站，如果现在将这些设计方案提交安全当局以求完工的话，安全当局极有可能不予批准，因为这些老方案会引发很多问题。

2009年，沃茨巴反应堆的拥有者——田纳西流域管理局，也开始调研重新启动位于美国亚拉巴马州的贝尔丰特(Bellefonte)的两个机组建设的可能性。这两个核电机组建设于1974年。在20世纪80年代中期停工⁵。估计当时1号机组已完成90%以上，2号机组已完成60%左右。像贝尔丰特和沃茨巴这样使用约40年前设计方案的核电站，如果现在将这些设计方案提交安全当局以求完工的话，安全当局极有可能不予批准，因为这些老方案会引发很多问题。

3 查塔努加时报，《田纳西核电站预期成本上升》，A1版，2008年12月12日。

4 <http://www.tva.gov/environment/reports/wattsbar2/seis.pdf>

5 <http://web.knoxnews.com/pdf/082708bellefonte-reinstatement.pdf>

表 3 1990 年以前开建的核电站

国家	地址	技术	供应商	产能（兆瓦）	开建日期	完成情况（%）	预计商运时间
阿根廷	阿图查 (Atucha) 2 号	HWR	西门子	692	1981	87	2010
巴西	昂格拉 (Angra) 3 号 *	PWR	西门子	1275	1976	10	
保加利亚	贝勒尼 (Belene) 1 号 *	WWER	俄罗斯	953	1987	0	
保加利亚	贝勒尼 2 号 *	WWER	俄罗斯	953	1987	0	
伊朗	布什尔 (Bushehr)	WWER	俄罗斯	915	1975	99	2010
罗马尼亚	塞尔那伏达 (Cernavoda) 3 号 *	Candu	加拿大原子能公司	655	1983	23	
罗马尼亚	塞尔那伏达 4 号 *	Candu	加拿大原子能公司	655	1983	12	
罗马尼亚	塞尔那伏达 5 号 *	Candu	加拿大原子能公司	655	1983	8	
俄罗斯	巴拉科沃 (Balakovo) 5 号 *	WWER	俄罗斯	950	1986	高	
俄罗斯	加里宁 (Kalinin) 4 号	WWER	俄罗斯	950	1986	高	
俄罗斯	库尔斯克 (Kursk) 5 号 *	RBMK	俄罗斯	925	1985	高	
俄罗斯	伏尔加顿斯克 (Volgodonsk) 2 号	WWER	俄罗斯	950	1983	高	2010
斯洛伐克	莫科夫斯 (Mochovce) 3 号	WWER	俄罗斯	405	1983	40	
斯洛伐克	莫科夫斯 4 号	WWER	俄罗斯	405	1983	40	
乌克兰	赫梅利尼茨基 (Khmelnitsky) 3 号	WWER	俄罗斯	950	1986	30	2015
乌克兰	赫梅利尼茨基 4 号	WWER	俄罗斯	950	1987	15	2016
美国	沃茨巴 (Watts Bar) 2 号	PWR	西屋电气	1165	1972	70	2012
总计				14403			

来源：PRIS 数据库，<http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>；核子新闻，《世界核电站一览表》

注 1：带 * 号反应堆已停工。

表 4 截止 2010 年 1 月 1 日尚未开工的核电站订单

国家	地址	技术	供应商	产能（兆瓦）	订单日期
中国	台山 2 号	EPR	阿海珐	1700	2008
阿联酋	不 详	AP-1400	韩国	4 x 1400	2009

来源：各种新闻报道



© Forolia

2. 核经济的决定性因素

核能发电的成本主要由几个重要因素决定（见表5）。这些因素有些很直观，但有些却不那么明显。根据法国核电站供应商阿海珐核能公司的估算⁶，核电站每生产一度电的成本如下：70%是核电站建造时的“固定”成本；20%是核电站运营的“固定”成本；另10%则是核电站运营的“可变”成本。其中，建造的固

定成本主要由偿还贷款利息和贷款组成，而且退役成本也要算入其中。另外，核电站的发电成本还取决于核电站自身的可靠性。核电站的可靠性越高，其电能产量也就越大，相应的，平摊到每度电上的固定成本也就越低。核电站的主要经营管理成本并不是核燃料成本，而是运营成本、维护和维修成本。

表 5 核能经济——成本要素（基于阿海珐核能公司的分析报告）

占总成本的比例	描述
70%	核电站建造的固定成本：贷款利息 / 资本偿还
20%	固定运营成本（每度电）：取决于核电站的可靠性（例如，负荷因子）
10%	可变成本：操作、维护、维修和核燃料
未计入上述三类之内的其他成本	核电站退役、核废料处置和管理、核反应炉核心熔毁风险、对于环境和人类的危害

⁶ http://www.aveva.com/servlet/BlobProvider?blobcol=urluploadedfile&blobheader=application%252Fpdf&blobkey=id&blobtable=Downloads&blobwhere=1246874807296&filename=Overview_June_2009%252C0.pdf

在仔细研究这些成本要素之前，我们首先要注意一个问题，那就是商业利益与社会利益有着明显的不同。那些在遥远的未来才会发生的巨额成本基本不会影响现阶段的商业决策，因为这种成本被“打折扣”了（见附录3）。这意味着核废料处理成本和核电站退役成本目前只不过是一种不好的猜测，对商业公司来说没有太多的意义。但是，从道德的角度来看，这一代人应该保持谨慎的态度，不能给下一代留下这种不确定的、昂贵的甚至是可能有危害的遗产，尤其是当这一代人没法保证给下一代人留下足够的金钱来处理这些问题和忍受其所带来的身体危害时。同样的，发生意外事故的风险也不在商业决策的考虑范围之内，因为这些风险已被一些国际条约转嫁给了纳税人，商业公司无需承担。

那些在遥远的未来才会发生的巨额成本基本不会影响现阶段的商业决策，因为这种成本被“打折扣”了。这意味着核废料处理成本和核电站退役成本目前只不过是一种不好的猜测，对商业公司来说没有太多的意义。

2.1 核电站的建造成本和时间

对于每度电的总成本而言，会受一些其他因素，如资本成本和核电站的可靠性的影响，但建造成本是最受关注的也是争议最多的。为了比较各种成本，各电力公司引入了“隔夜”成本的概念。“隔夜”成本包括核电站建造成本、首次核燃料填充成本，但不包括核电站建造时借款的利息成本，即我们所熟知的“建造期利息”（Interest During Construction, IDC）。为了方便对不同产能的核反应堆进行比较，我们常把成本平摊到核电站的总发电容量上，即核算每千瓦电量的成本是多少。所以，如果一座核电站的成本为

24 亿美元，而其电能输出率为12 亿瓦，那么其成本就为2000 美元/ 千瓦。以下一系列的因素分析可以帮助我们理解为什么在预测核电站建造成本上会出现如此大的争议。

2.1.1 数据的不可靠性

关于核电站建造成本的预计很多情况下都应该审慎对待。一般而言，预测未来成本的最可靠指标就是“过去成本”⁷。然而，各电力公司并没有被要求适当地公布审计过的建造成本，而且也没有动力

将其业绩透明化。但美国是个特例，在美国，各电力公司需要向有关经济管理部门提供可靠的建造成本明细（因为只有提供了审计合理的成本明细，这些部门才允许各电力公司向消费者收回其生产成本），

因此，美国核电站的“过去成本”数据是可靠的。另外，英国的西泽韦尔B 核电站由于建造成本可操作空间较小，其他活动较少，其成本记录也是可靠的。

另外，预测未来成本的另一个参考指标就是核电站的招标价格。核电站的实际成本通常要高于（通常是显著高于）合同成本，供应商必须要合理定价。如果是“交钥匙”订单——即不论实际成本如何，客户只需要按照订单上的固定价格进行支付——供应商就会尽力将投标价格定得尽可能的准确。

只有当供应商自信能控制建造成本的每个部分时，才有可能签订“交钥匙”合约。这一代的燃气电厂和联合循环燃气轮

⁷ 对学习效应、规模经济和技术进步的错误预期（这些效应并没有反映到成本当中），使得几乎所有的成本估算都是过度乐观的。

机电厂经常是签订“交钥匙”合约出售的，因为这些电厂大致都是在供应商控制的工厂中建造的，而且对现场操作的要求也相对较低。在20世纪60年代中叶，美国四大核电站供应商按照“交钥匙”合约共售出了12座核电站，但是由于对成本控制不当，他们在这些合约中损失巨大。从那以后，没有供应商再愿意冒风险按照“交钥匙”合约整体出售核电站了。但是要注意的是，核电站的单个仪器是有可能按照“交钥匙”合约方式出售的，按“交钥匙”合约整体出售核电站时，在定价方面一定要极其审慎。一般认为，奥尔基洛托（Olkiluoto）的订单是“交钥匙”类型，其中，阿海珐负责核电站建造工程的管理。但是，正如4.1所描述的那样，当时阿海珐与其客户芬兰电力公司（Teollisuuden Voima Oy，简称TVO）就合约的一些条款，尤其是哪方负担超支成本的问题方面，发生了一些纠纷。还要注意的，一些供应商对于“交钥匙”的定义较为宽泛，有时，只意味着合约包括了整个电厂。

我们必须对供应商提出的指导价格持怀疑态度。通用电气—日立核能联合公司（GEH）承认，供应商在提供指导价格时并不是很仔细，有些过于乐观的价格常常是现实中达不到的。通用电气—日立核能联合公司总裁兼首席执行官杰克·富勒（Jack Fuller）说道：“核反应堆建造工程超出预算太多，就会打击公众对于核工业的信心。”⁸

有些工业组织，如世界核协会和其他类似的国家组织，是技术的既得利益者，而不受价格的影响。因此，对于它们提出的价格，我们也必须保持怀疑态度。

另外，我们还要谨慎对待一些国际机构（如核能机构NEA）所提出的价格，特别是当这些价格是基于指示性成本而不是真实成本的时候。一般来说，成本数据都由国家级的政府机构公布的，可能由于某种原因，政府机构为描述核能的美好前景，所公布的数据通常都不是基于实际成本的。

众所周知，对核电站的建造成本的预测通常都很不准确，经常会被严重低估。一般，对于大多数技术而言，由于学习效应、规模经济和技术进步等原因，该技术在每一代的发展和使用中，真实成本会逐渐降低，但与之相反，核工业的真实建造成本不仅没有降低，反而随着时间的推移而逐步提高。当然，由于各地劳动力和原材料（如钢筋和混凝土等）的价格不一，不同国家核电站的建造成本也会不可避免地存在一些差异。

2.1.2 难以预测性

很多因素都会造成核电站建造成本的难以预测性。第一，目前所有待出售的核电站都要求大量的现场施工，其成本大约占总建造成本的60%，而与之相比，一些大型机械设备（如涡轮发电机、蒸汽锅炉和反应炉）占总成本的份额却相对较小⁹。众所周知，对于需要大量现场工程的项目而言，成本控制和管理都很困难。例如，英国的英吉利海峡隧道和泰晤士河堤坝项目的成本都远远超出了预算。对于第四代核反应堆，预计大部分都可在工厂中建造，因此在工厂中，建造成本更易得到控制。

第二，一些特定的现场因素也会对实

⁸ 原子核周刊，《通用电气—日立核能联合公司：成本估算的确给工业带来了“伤害”》，2009年9月17日。

⁹ 由于核工业建设成本控制较为困难，因此世界银行不向核项目提供贷款。见《环境评估手册：能源与工业项目环境评估指导原则（第三册）》。世界银行技术报告154（华盛顿特别行政区：世界银行，1991年）。

际成本产生很大的影响，例如冷却方法。通用电气—日立核能联合公司总裁富勒认为成本预测的主要问题是没人去想方设法搞清楚一些基本问题，如“这些数据代表什么？……其中包不包括燃料？核电站是使用盐水还是使用淡水？”该公司核电站项目高级副总裁丹尼罗·德里克（Danny Roderick）说：“根据通用电气—日立核能联合公司的经验，使用盐水和使用淡水冷却会导致10亿美元的成本差别。”¹⁰

第三，如果必须改变原有设计方案，例如原设计方案较差，或者安全管理部门要求对原有设计方案进行改善，再或者在建造开工时设计方案还没有最后完成，那么成本就会显著提高。为了解决上述问题，现在核电站的建造方都设法在工程开始前就取得安全部门的全部认证（如美国建造和运营复合执照，**Construction and Operation Licenses**，简称COL），同时还要求，在工程开始前，必须完成全部设计方案，使之尽可能合理。但在实际中，供应商经常声称其设计是完整的，就像当时芬兰正在建造中的奥尔基洛托核电站一样（见4.1）。但事实是，从施工开始四年的时间过去了，到2009年，奥尔基洛托核电站的设计方案依旧不完整。由于种种原因，设计方案改变的风险是不能被完全规避的，尤其是有时需要用新的设计方案来解决施工中不可预测的问题时，或相关管理部门对一些设计细节不满意时。例如，2009年，有关管理部门就对正在建造中的奥尔基洛托核电站的控制和仪器使用系统表示了担忧。如果不做大幅度的改动，这些管理部门就不会给这个核电站颁发营业执照（见4.1）。

另外，其他核电站的核反应堆运营经验也可能是导致已开工的设计方案发生改变的原因。例如，如果已有核电站发生了较大的核事故，那么所有在建核电站（正在运营的核电站也是一样）都需要从中吸取经验教训，重新审核自己的设计方案。不能仅仅因为现有设计已经获取了安全认证而忽视核事故中所暴露出的问题。

2.1.3 学习效应、规模经济和技术进步

对于大多数技术来说，由于学习效应、规模经济和技术进步等原因，下一代技术的成本都会低于上一代。随着时间的推移，核工业技术到底取得了多大的进步一直是争议的焦点，事实是，核工业技术的成本并没有下降。这种现象背后的原因较为复杂、不容易被理解，但最经常提到的两个因素一是不断提高的监管要求（注意，相关的监管标准并没有提高，而是为满足这些标准所必要采取的措施提高了），二是针对第一代核反应堆采取的不合理的削减成本措施。

当代反应堆的订单很少，特别是明确列出成本的更少，因此很难确认核电站的成本是否已经稳定了，更不用说是否开始下降了。但是，“学习效应”（或者说是重复过程中的进步）和规模经济是两种前进的方式。20世纪70年代，主要的核反应堆供应商每年都能接到10个订单。良好的销量使得这些供应商有资本建立有效的生产线来生产核心部件，同时也使它们能组建起良好的设计师和工程师团队。但这种规模经济能带来多大程度上的成本削减是很难估计的。一份2000年核能机构（NEA）的报告显示，规模经济只是一种直觉，可能并不准确。报告提到：¹¹

¹⁰ 原子核周刊，通用电气—日立核能联合公司：成本估算。

¹¹ 核能机构(NEA)，《降低核电站资本成本》（巴黎：经济合作和发展组织，2000年），第90页。

如果同时预订两台机组，建造时间相差12个月以上，那么第二台机组的成本相较第一台可下降15%左右。如果第二台机组和第一台完全相同，那么其成本可降低约20%。但是，继续订购同系列的机组并不会明显的节约更多的成本。如果生产两台以上相同设计的机组，标准化生产的效应小到可以忽略不计。

2002年，英国内阁办公室的性能和创新局（Performance and Innovation Unit, PIU）对本国的核能经济进行了审查。当时，英国能源公司（British Energy，一家核电站的所有者）和英国核燃料公司（BNFL，一家核电站供应商）向该工作组提供了一份关于核电站成本预测的数据，该数据是基于“学习效应和标准化中的规模经济”得出的。性能和创新工作组承认确实存在着学习效应，但却对学习效应的影响持怀疑态度，认为其影响还是很有限的。该工作组表示：¹²

“核能的学习效应在速度和影响范围方面都弱于可再生能源，因为：

- 核能建设工程的交付时间较长，导致其运营中的经验反馈较慢；

- 设计方案改变时，需要重新申请安全认证，这进一步拖延了时间；

- 可再生能源的设备中包含成百上千个零部件，因此与可再生能源相比，核能设备的生产运行更短，核能的规模经济更小。”

近20年来，世界主要反应堆供应商仅收到了为数不多的订单，他们自己的生产线已经关闭，技术团队在不断缩减。2008年，西屋电气收到了来自中国的四组核反应堆的订单，但在此之前的25年

中，该公司只收到过一份订单。即使是法国巨头阿海珐，在将近15年的时间里也只收到了芬兰的一份订单。因此，对于新的核电站订单，各供应商不得不把大部件的制造分包给专业化零部件生产公司，而且经常是一次性的生产。这些部件由坐落在日本（将来可能是中国）等国家的专业化公司生产的成本会比较高。¹³业内人士承认，目前核电站零部件制造企业十分缺乏。例如，到2009年末，世界上能制造某些核反应堆压力炉的企业只有日本钢铁公司一家。

技术缺乏问题也十分紧迫。德国环境部的一份报告这样阐述道：¹⁴

“目前，各国在核能技术和能力方面都存在着一定的不足，这也是世界各国都普遍认可的。各国都采取了多种国家层面和国际层面的措施来扭转这一趋势。尽管如此，还是不能使所有相关方都达到必要的就业水平。核能方面的大学毕业生和技术人员远远不够，而且很多这方面的大学毕业生根本不进入核能行业，或者进入后很快就离开。核工业缺乏科学家、工程师和技术人员，面临着残酷的市场环境，它要与很多其他工业展开激烈的竞争。因此，内部人员培训只能部分地解决问题。”

2.1.4 建造时间

建造时间超过预期本身不会直接导致建造成本的增加，尽管建造时间的延长会导致贷款的利息成本增加，而且通常还会产生其他问题，如设计方案问题、现场管理问题或采购问题，这些都会反映在建造成本上，使成本增加。但是，延期对于电

12 性能和创新局，《能源问题回顾》，内阁办公室（伦敦：2002年），第195页。<http://www.strategy.gov.uk/downloads/su/energy/TheEnergyReview.pdf>.

13 例如，如果有人订购弗拉芒维勒（法国）的欧式压水反应堆（EPR），那么这组反应堆的压力炉很可能由日本制造。世界银行技术报告154（华盛顿特别行政区：世界银行，1991年）。

14 M. Schneider, S. Thomas, A. Froggatt 和 D. Koplow:《2009年世界核工业发展状况报告》，德国环境、自然观测与核反应堆安全部（2009年），http://www.bmu.de/files/english/pdf/application/pdf/welt_statusbericht_atomindustrie_0908_en_bf.pdf.

力公司（尤其对规模较小且该新建电站所占比重较大的公司而言）的影响是十分严重的，尤其是当合同中已经规定核电站产能的情况下。

奥尔基洛托核电站签订建造合约之时，就预计可于2009年5月投入使用。然而，到2009年5月，核电站还需要将近四年的时间才能完工，而此时，按照合同规定，该电站应该已经发电而且发电量应该供应给芬兰的能源密集型工业。因此，在核电站完工之前，不论北欧市场上能源的价格如何，该电力公司都不得不从北欧电力市场上购买“替代能源”来按合约满足消费者的需要。如果当时的供求关系十分紧张（例如某个冬天的降水量较小，从而限制了水力发电量），那么该电力公司所要承担的成本就会远高于合约中的销售价格。另外，如果北欧市场的电力价格显著高于合约中奥尔基洛托核电站的核电售价，那么该电力公司也不可能长时间地承受这种损失。

总的来说，核电站的交付时间（从决定建造核电站开始到其正式运营，即对核电站的前期检测完成，运营权从供应商移交到核电站所有者的手中）总会比建造时间更长。例如，英国早在1979年就决定建造西泽韦尔B核电站，但是工程到1987年才开始正式动工（延迟的原因不仅是因为征求公众意见，还因为在完成设计方案中的困难）。直到1995年，该核电站才正式投入使用，所以该核电站总的交付时间为16年。核电站预建设期的成本与建设期成本比较都相对较低，除非是“世界首创”的反应堆，因为这种反应堆的设计方案和安全认证都较为昂贵。但是，对于一个竞争环境下的制造商而言，这种长时间的拖延和高风险——如规划征求意见阶

段的失败风险或者监管部门要求带来的成本提高风险——是打消其进入核能行业念头的主要因素。

2.2 资本成本

另一个因素是从资本支出角度衡量建造成本（见附录2）。总的来说，大型项目都是通过债务（银行贷款）和股权（基于公司收入的自我筹资）组合方式筹集资本的。对于债务来说，资本成本取决于时下流行的“零风险”利率，如国债利率，加上代表项目风险程度的风险因子再加上与银行保证金和成本之和。

股权融资的经验表明，那些资源丰富的大公司可以轻松地用自己的收入进行投资，而无需依靠借款。但是，股权投资的本质是公司推迟给各股东的红利，这些红利本来是可以立刻发给各股东的，公司利用这些股东红利进行再投资。这些钱被用于投资新的项目，从长期来看，股东能从这些项目的利润中获得补偿。但为了补偿股东的延期收入，公司必须支付给股东利息（因为股东用这些红利进行低风险投资的话是会获利的），还要给股东额外的补贴以反映这些股东的资本使用风险（也就是该项目没有带来预期收入的风险）。因此，与债务融资相比，股权融资的成本相对较高。

当银行拒绝给予贷款时，股权融资是唯一的选择。这种情况本质上是，公司向各股东借款，投资于一个银行不肯贷款的项目。由于这样一来，这些大项目中股权资本比例较高，因此可能会遭到各股东的反对。同样的，银行也不会投资于一个股权资本比例较小（意味着公司不准备拿自己的钱冒险）的项目。

众所周知，美国公司在启动核能2010项目时，预计债务融资和股权融资各半。到2008年情况才逐渐清晰，这些公司希望利用联邦贷款担保，尽量多地使用银行贷款筹资。银行也表示，只有当贷款担保覆盖范围十分广泛时，他们才同意给项目贷款。正如第5节所提到的那样，华尔街6家最大的投资银行向美国能源部声明，除非纳税人承担100%的风险，否则他们将不会再给新的核电站项目提供贷款。¹⁵

由于每个国家的国家风险不同，各公司的信用等级也不同，因此不同国家、不同公司的真实（零通货膨胀率）资本成本各不相同。同时，各国电力行业的组织形式不同也会对真实资本成本产生较大影响。如果一国电力行业是有管制的垄断行业，那么其真实资本成本会较低（5%—8%），但如果一国电力行业是处于完全竞争的市场环境中，那么其真实资本成本至少为15%以上。以佛罗里达州和佐治亚州为例，监管部门允许各电力公司在核电站建造前就可以在电费中回收新建核电站的成本，因此各电力公司就不会过多地依赖贷款担保来获取低息贷款了。佐治亚州公共服务管理委员会（Georgia Public Service Commission）批准了佐治亚能源公司（Georgia Power）

（该公司占沃格特勒核电项目45.7%的股份）的申请，允许该公司通过2011年才开始实施的“在建工程”回收其融资成本64亿美元。这个核电站的发电容量为22.34亿瓦。¹⁶ 允许成本回收的规定意味着，即便没有得到联邦贷款担保，各电力公司也能

继续进行工程建设。这项规定也降低了佐治亚能源公司所分担的预期成本，包括融资45.29亿美元。¹⁷

很明显，如果资本成本是核电站总成本的最大部分的话，那么回报率两倍以上要求就会对核能的经济可能性造成毁灭性的打击。对于资本成本所占比例应该为多少，没有一个“正确”的答案。当一国电力行业是垄断行业时，那么电力公司就可以保证收回全部成本。换句话说，无论他们花多少钱进行投资，他们都能从消费者那里将其收回。在这种情况下，由于消费者承担了全部的风险，投向该项目的资本风险就较低。由于国家的不同和公司体制的不同（国有或私有），资本成本也各不相同。一些国有企业，如瑞典国有电力公司瓦腾福，具有较高的信用等级，因此其资本成本也相对较低，而一些部分或全部私有公司，如德国两大电力公司意昂集团（E.ON）和莱茵集团（RWE），它们的资本成本则相对较高。国有企业中来自股东的压力一般相对较小，因此使用股权融资也更加容易。对于发达国家来说，真实资本成本，即剔除通货膨胀率后的年贷款利率，一般在5%—8%的范围内浮动。

在一个有效的电力市场环境中，投资的风险应由核反应堆制造公司而不是消费者来承担，而且资本成本能反映出这种风险。

在一个有效的电力市场环境中，投资的风险应由核反应堆制造公司而不是消费者来承担，而且资本成本能反映出这种风

险。例如，在2002年英国，40%的发电量来自财政运作不好的电力公司（其中一半是核能发电），并且一些公司和银行

¹⁵ 《对能源部规定草案的若干评论》，2007年7月2日。

¹⁶ 《普拉茨全球能源报告》，佐治亚州产品安全管理委员会允许佐治亚能源公司建造两座核电站，及一座生物质能转换厂，2009年3月19日。

¹⁷ 原子核周刊，《佐治亚能源公司降低了沃格特勒核电站的预算》，2009年11月11日。

在其开发或投资的发电站项目中损失了数十亿英镑的资金。在这种情况下，真实的资本成本高于15%是合理的。如果此时风险被人为降低了，例如政府出面保证能源市场及其价格，那么资本成本就会降低，但是这意味着政府必须给予补贴（援助措施），而在欧盟的法律规定下，这种做法是否被认可尚未可知。

2.3 运营性能

对于像核能这样的资本密集型技术而言，高利用率是十分重要的。因为只有利用率较高，那些巨大的固定成本（资本偿还、利息和退役成本）才能分摊到尽可能多的可出售产能上。另外，由于核电站设备较为固定，因此在非必要的时候启动和关闭核电站或改变其电量输出水平都是很不明智的。因此，核电站都在“基本负荷”

下运营，但有少数几个国家（如法国）例外，在这些国家里核能发电所占的比例十分高，因此不可能全部在“基本负荷”运营。“负荷因子”（美国称之为“容量因子”）能较好地衡量核电站的可靠性和生产可售电量的效率。“负荷因子”为，在给定时间段内，核电站的实际发电量占最大发电量（核反应堆未被干扰全负荷运营时的发电量）的百分比。¹⁸ 一般来说，“负荷因子”是以年或寿命周期为单位计算的。与建造成本不同，“负荷因子”是可以准确计算出来的，因此，一些贸易媒体，如《原子核周刊》和《国际核工程报》，以及国际原子能机构（IAEA）会定期公布“负荷因子”表。对于核电站停产或减产的原因还有争议，尽管从经济的角度来看，与核电站停产的事实相比，核电站为何停产更加重要。

表 6 德国核电站的运营业绩

核电站	商业运营开始日期	2008 年负荷因子 (%)	2008 年末寿命周期负荷因子 (%)
Biblis A	2/1975	82.6	65.2
Biblis B	1/1977	95.2	67.7
Brokdorf	12/1986	92.4	88.5
Brunsbüttel	2/1977	0.0	53.7
Emsland	6/1988	93.3	93.3
Grafenrheinfeld	6/1982	87.2	86.2
Grohnde	2/1985	88.3	90.6
Gundremmingen B	7/1984	85.7	82.6
Gundremmingen C	1/1985	87.7	80.4
Isar 1	3/1979	98.3	79.3
Isar 2	4/1988	93.2	89.6
Krümmel	3/1984	0.0	71.6
Neckarwestheim 1	12/1976	54.9	79.5
Neckarwestheim 2	4/1989	93.0	92.7
Philippsburg 1	3/1980	78.4	79.0
Philippsburg 2	4/1985	88.7	88.2
Unterweser	9/1979	78.7	79.6

来源：国际原子能机构（IAEA），<http://www.iaea.or.at/programmes/a2/>

注：Krümmel 和 Brunsbüttel 两座核电站在 2008 年处于关闭状态。

¹⁸ 值得注意的是，有些机构用授权产出而不是设计产出来计算负荷因子。虽然这样计算也能表现核电站的一些有用信息，但从经济学的角度来看，应该用设计产出因为那才是买方用资金所购买的部分。

表6显示德国核电站在2008年和寿命周期的负荷因子。可以看出，德国核电站的可靠性波动范围较大，其中，三座核电站的寿命周期负荷因子都超过90%，而另有三座的寿命周期负荷因子却低于70%。

与建造成本一样，运营核电站的负荷因子也远低于预测值。那些极力宣传核技术的供应商都假设核电站极其稳定，只有当维护设备和重新填充核燃料时才会使电站的运营间断（有些核电站，如改良式气冷反应堆AGR和加拿大重水铀反应堆CANDU，燃料填充是持续进行的，因此只有在维护设备时才需要关闭整个核电站），因此根据上述假设，负荷因子可达85%到95%。但是，实际上电厂运营业绩并不好，在1980年左右，全世界核电站的平均负荷因子大约只有60%。为了说明负荷因子这个指标对核电站经济状况的影响，我们假定一座核电站的固定成本占其总成本的60%，初始负荷因子为90%，那么当负荷因子降低为60%时，该核电站的总成本将提高三分之一。如果较低的负荷因子是由设备故障或由维护维修成本的提高而引起的，那么其结果必然是每单位核电的成本提高。在竞争性市场环境中，如果一家核电公司签订了合约但由于这样或那样的原因而不能完成既定目标，那么它很可能会去以较高的价格来为其客户购买“替代能源”。

但是，从20世纪80年代后期开始，全世界的核工业都在努力地改善业绩。目前，世界核电站平均负荷因子超过80%，例如目前美国核电站的平均负荷因子接近90%（而1980年这个数字仅不足60%），但美国核电站的平均寿命周期负荷因子还只有70%。

在全世界，运营超过一年且有满负荷发电记录的核电站共有414座，其中只有7座的寿命周期负荷因子超过90%。另外，只有排名在前100位的核电站其寿命周期负荷因子才超过80%。一个有意思的现象是，世界排名前13位的核电站只分布在3个国家：6个在韩国，5个在德国，另外2个在芬兰。

新一代核反应堆的目标是达到目前排名前2%的反应堆的可靠度，但像之前的反应堆一样，这些新一代的反应堆也同样会遇到“磨合问题”。在这一点上，20世纪90年代法国N4核反应堆就很典型。值得注意的是，从经济学的角度来看，由于存在折旧的影响，核反应堆的前期表现（在这个时期，很容易出现“磨合问题”）比其后期表现更为重要。在核反应堆运营后期，由于设备老化并需要替换，其业绩会下降。这时，核电站需要改进核反应堆的原设计方案，以达到新的安全标准的要求。由于折旧的存在，在经济分析中，这种后期业绩的下降可能不那么重要。总的来说，根据过去的经验判断，90%或更高可靠性的假设很可能站不住脚。

2.4 非燃料运营成本和维护成本

很多人都认为，核电站就是一组能自主运行的机器设备，人们只需要购买燃料就可以了，其运营成本较低。因此，在核能经济学中，有关非燃料运营成本和维护成本（operations and maintenance, O&M）的研究很少成为主流。核燃料的成本相对较低而且可以较好地预测（见下文讨论）。但是，实际上认为核电站运营成本较低的观点是错误的。在20世纪80年代末90年代初，美国的一些核电站停止生产，其原因就是这些核电站的运营成本（除偿还固定成本之外）比建造成本还高，而且也比一座可替代的燃气发电站

的运营成本也要高很多。人们发现，这些核电站的平均非燃料运营和维护成本大于22美元/兆瓦时，而核燃料的成本只是大于12美元/兆瓦时。¹⁹从那以后，核工业技术人员努力降低非核燃料运营和维护成本。到20世纪90年代中叶，非核燃料运营和维护成本平均值已经下降到12.5美元/兆瓦时，核燃料成本则下降至4.5美元/兆瓦时。然而，值得注意的是，成本的下降主要是由于核电站稳定性提高了（即减少消耗），而不是真正的成本降低了。在核电站的发电量水平固定的情况下，很多运营和维护成本（雇用人员和维护核电站）都是固定的，波动幅度较小。所以，对于给定核电站，其发电量越多，每兆瓦时所分摊的运营和维护成本就越低。在美国，由于经济原因造成的核电站提前停产的情况基本上不存在了。

另外值得关注的事件是，英国能源公司于1996年成立，旗下共有8个核电站，由于核电站的收入低于运营成本，而最终在2002年破产。英国能源公司的破产，部分原因是高额的燃料成本，尤其是对乏燃料的再处理成本。目前，只有英国和法国还继续实施核燃料的再处理（见下文）。从1997年到2004年，英国能源公司的8个核电站的平均运营和维护成本，包括核燃料成本，在1.65—2.0便士/千瓦时之间波动。但是，2004年以后，运营成本呈现逐年递涨的趋势。在2007年8月公布的2006年全年的数据显示，核电站运营成本为3便士/千瓦时；在2008年9月公布的2008年前6个月的数据显示，运营成本为4.13便士/千瓦时（在那之

后，该公司被法国电力公司EDF接管，其运营成本数据尚未公布）。

2.5 核燃料成本

占核电站总成本约5%的核燃料成本包括：铀矿石采掘成本、铀“浓缩”（增加其中有用铀的同位素的比例）成本、将其制成核燃料的成本、使用后的储存成本和安全处置成本（必须要使核废料与自然环

境安全地隔离成百上千年）。这里没有对核燃料采购成本以外的其他成本做进一步的分析。从20世纪70年代中叶到2000年左右，世界铀价格一直保持较低水平（U3O8价格大约为12美元/磅），因此核燃料成本保持下降趋势。但从2000年以后，铀的价格攀升至150美元/磅（见表7）。随后，到2009年末，铀现货价格又下降到了50美元/磅以下。这些现货价格不具有指导性，因为铀的现货市场十分“薄弱”，只有少量的铀被拿到现货市场上出售，而大量的铀都是在双边协议下买卖的。美国的核燃料平均价格大约为0.25便士/千瓦时，但该价格被认为是人为降低的。这是因为，美国政府自诩有责任对核废料进行处理，并作为报酬可获得固定收益1美元/兆瓦时（0.06便士/千瓦时）。这个20多年前设定的价格是主观的，没有基于现实情况，因为现实情况是目前美国和其他国家都没有核废料处理设备。目前，美国所有核废料都被暂时性储存着，直至真正的核废料仓库建造起来，该仓库预计建在尤卡山（Yucca Mountain）。核废料处理的真实成本可能会高出很多。

¹⁹ 有关运营和维护成本的数据，请见<http://www.nei.org/index.asp?catnum=2&catid=95>。

表 7 铀的价格



来源： <http://www.infomine.com/investment/charts.aspx?mv=1&f=f&r=10y&c=curanium.xusd.ulb#chart,2010-03-11>

核废料的处理问题很难评估。核燃料的再处理也是很昂贵的，除非所回收的铀能够被有效地利用创造利润，否则再处理过程对于核废料的处理没有帮助。再处理仅仅将核废料分成若干不同部分，并不降低核废料的放射性数量。另外，由于再处理所用的所有设备和物质都成了核废料，核废料再处理反而是又产生了大量低放射性或中等放射性的核废料。有报告表明，先前英国核燃料公司与英国能源公司（在其倒闭前）签订的英国能源公司核废料再处理合约，每年将耗费3 亿英镑，相当于0.5 便士/千瓦时。这份合约每年能帮英国能源公司节省1.5 到2 亿英镑的开支，但这只有在英国政府承担该公司损失的情况下才可能发生。尽管美国在成本控制方面的经验不足，但据说美国也正在考虑允许对

核废料进行再处理，虽然之前卡特政府曾颁布过相关禁令不允许对核废料进行再处理。由于目前没有已建成的甚至是在建的核废料处理设施，而且对核废料处理的成本预测也有很大的出错空间，因此很难对高风险的核废料处置成本进行估算。

2.6 核电站的会计使用寿命

改良式第三代核电站的一个显著特点就是它的使用寿命较长，大约为60 年，而前几代核电站的使用寿命只有它的一半左右。对于固定成本较大的技术来说，可以预见使用寿命的加倍会使成本收回的时间也延长，因此会显著降低分摊在每个产出单位上的固定成本。但在实际中，这并不成立。商业贷款必须在15—20 年内还清，

对于固定成本较大的技术来说，可以预见使用寿命的加倍会使成本收回的时间也延长，因此会显著降低分摊在每个产出单位上的固定成本。但在实际中，这并不成立。

而且按现金流折现法来计算，超过10—15年之后的成本和利润基本上可以忽略不计（见附录2）。

现在，延长已有核电站的使用寿命已经成为一种趋势。对于那些已经达到其40年批准使用寿命的压水反应堆（PWR）和沸水反应堆（BWR），美国有关安全部门又批准了20年的额外使用寿命。另外，我们也不能认为一旦资本成本偿还完毕后，电力成本就会下降，因为核电站使用寿命延长还会带来其他的成本花销，如替换老化的设备零件，改进设备以达到当前的安全标准等。同时，要注意的是延长核电站的使用寿命不是在什么情况下都可行的。例如，英国的改良式气冷反应堆按原设计方案拥有25年的使用寿命，但现在想要延长至40年。然而，这种使用寿命的延长是不可行的，因为其石墨减速器的腐蚀和变形问题已经极其严重。

2.7 核电站退役和处理成本与资金储备

目前几乎没有商业规模核电站退役的经验，而且核电站废弃物的处理（尤其是那些中等放射性和高放射性的废弃物）成本也是不确定的（见附录3），因此很难估算核电站的退役和拆撤成本。即便是资金保障状况良好（需要资金时随时都可支取），也不会对核电站的总体经济状况做出多大的改善。例如，如果要求核电站在运营之初就储备一笔（折现后的）资金用于核电站的退役，那只会增加10%的建造成本。英国能源公司设置了一笔单独资金为退役工作做准备，要求每年注入少于两千万英镑的资金，只相当于0.03便士/千瓦时的成本，事实上，这笔钱还不够第一阶段的退役费用。

常见的问题是，在核电站运营年限未达到其使用寿命之前，才发现退役成本被低估了，或者资金流失了，再或者是公司倒闭了。这些问题在英国都实实在在的发生过。在过去的几十年中，核电站的退役成本实际上翻了好几番。1990年，英国中央电力总局（Central Electricity Generating Board, CEGB）私有化，由核电公司（Nuclear Electric）公司接管，但其由消费者参与制定的相关会计准则却没有被继承下来。英国在1990年到1996年给予的政府财政补贴，迈克尔·赫塞尔廷Michael Heseltine²⁰，将其描述为用来“拆撤旧的不安全的核电站”，事实上都被各核电站公司以现金流方式花掉了，而其剩余部分现在都被国债所吸收。英国能源公司的倒闭意味着，很大一部分的核电站拆撤成本将在未来由纳税人承担。

2.8 保险和责任

保险和责任部分是备受争议的，因为根据相关国际条例规定，核电站公司承担的责任是很有限的，只承担大型核事故的小部分损失。《维也纳条约》于1963年通过，1997年重新修订。该条约规定一个核电站运营商应承担的责任是3亿国际货币基金组织的特别提款权（Special Drawing Rights），相当于4.6亿美元（2009年2月22日，1美元=0.653特别提款权²¹）。按巴黎和布鲁塞尔协议，该数额应该上升到7亿欧元（5亿英镑）。目前英国政府仍承担核电站超过1.4亿英镑的额外损失风险。限定运营商的责任对促进核电站的发展是必要的，但同时也意味着大量的政府补贴。

20 迈克尔·赫塞尔廷（Michael Heseltine），商贸部部长，英国议会议员，1992年10月19日。

21 特别提款权的价值由一揽子世界四种主要货币价值决定。

表8 为德国议会可持续能源研究委员会（Study Commission on Sustainable Energy）²² 所整理的经济合作和发展组织各成员国核电站责任限额。从上表不难看出，各国责任限额差别较大，从极低限额（如墨西哥）到较高限额（如德国）各不相同。

切尔诺贝利核灾难导致了数千亿磅核燃料泄露，这样大规模事故造成了巨大的损失。从中我们也能发现，核工业的保险可能没有达到传统的覆盖率，即便是达到

了，这种覆盖率可能是不可信的，因为如果真的达到了这样的覆盖率，那么一次大型事故就能让保险公司破产。

有人建议核电站公司发行“灾难债券”来为意外事故提供可靠保障。这种灾难债券是高回报且有保险支持的，但它规定，在发生诸如地震等灾害时，该债券的本金和/或利息将被延迟支付。到具体计划出台为止，这种债券到底能不能为对抗核事故提供可行的保障以及这种债券将对核能经济学产生何种影响都很难说。

表 8 2001 年 9 月经济合作和发展组织（OECD）成员国责任限额

	各国法律规定的责任限额 ^a	经济安全要求 ^{a,b}
比利时	€ 2.98 亿	
芬兰	€ 2.5 亿	
法国	€ 0.92 亿	
德国	无限制	€ 25 亿 ^c
英国	€ 2.27 亿	
荷兰	€ 3.4 亿	
西班牙	€ 1.5 亿	
瑞士	无限制	€ 6.74 亿
斯洛伐克	€ 0.47 亿	
捷克共和国	€ 1.77 亿	
匈牙利	€ 1.43 亿	
加拿大	€ 0.54 亿	
美国	€ 109.37 亿	€ 2.26 亿
墨西哥	€ 0.12 亿	
日本	无限制	€ 5.38 亿
韩国	€ 42.93 亿	

来源：非官方统计数据——OECD/NEA, Legal Affairs

注：a. 使用了 2001 年 6 月到 2002 年 6 月的官方汇率；b. 如果与责任限额不同；c. 这 25 亿欧元的经营资本的保费是 2.56 亿欧元，其中 1.79 亿欧元来自于对巴黎协议的布鲁塞尔修订。

22 Deutscher Bundestag, Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung, Bericht derEnquete- Kommission, zur Sache 6/2002, 第 3 章第 3.2 节, 表 3.3 (柏林: Deutscher Bundestag, 2002 年), 第 232 页。
<http://dip.bundestag.de/btd/14/094/1409400.pdf>.



© Greenpeace / NickCobbing

3. 奥尔基洛托和弗拉芒维勒核电站的经验

奥尔基洛托核电站和弗拉芒维勒核电站尤其重要，因为它们是目前仅有的改良式第三代核电站，即使这两座核电站目前仍在建造中还未投产，它们的经验也是非常重要的。

3.1 奥尔基洛托核电站

对于核能工业而言，芬兰奥尔基洛托3号机组订单显得尤为重要，因为它似乎违背了传统的认为自由化和核能订单无法协调的思维定式。奥尔基洛托3号反应堆始于2003年12月，是继1993年法国西沃村(Civaux)2号订单之后的西欧和北美地区第一个核订单，也是第一个环太平洋地区之外的第三代核电站或改良式第三代核电站设计的订单。从1992年开始，芬兰电力行业一直希望能获得议会的批准在芬兰建立第五台核电机组，这个想法终于在2002年实现了。总的来说，奥尔基

洛托3号订单是对核电行业而言是一个巨大的激励，对于阿海珐核能公司（Areva NP）来说尤为如此。根据行业预测，一旦奥尔基洛托3号完工，它将为其他欧式压水反应堆（EPR）的潜在买家提供示范和参考。

芬兰是北欧电力市场的一部分，北欧电力市场还包括挪威、瑞典和丹麦，这一地区通常被视为世界上最具竞争力的电力市场。芬兰已有的4台核电机组运行状况良好，也为芬兰带来了良好的声望。因此，本来可以通过研究芬兰的案例来解答有关“核能复兴”的众多问题。但是，在对奥尔基洛托3号机组订单进行细致的调查后发现，该订单具有一些极为特殊的特征，因而无法代表其他的市场情况。

根据2004年的报道，奥尔基洛托3号

的合同价格为30亿欧元，发电量为1600兆瓦²³。随后，这一价格变为32亿欧元²⁴或33亿欧元²⁵。2005年3月，芬兰辐射与核能安全局(STUK)给予了安全性批准，2005年8月现场实质性的工作启动了。签订合同时，造价约为36—40亿欧元（取决于合同价格），合2250—2475美元/千瓦（1欧元=1.2美元）。这一造价包括融资成本和两个反应堆芯，因此每千瓦的隔夜成本会低一些，尽管——从下文可见——由于其利率极低（2.6%），融资成本其实不高。

尽管该电站的造价高于核能产业几年前的预期目标1000美元/千瓦，但它仍被批评为“为招揽客户的廉价商品”。自20世纪90年代末开始，阿海珉核能公司一直试图劝说法国电力公司(EDF)或德国的电力公司订购一座欧式压水反应堆(EPR)²⁶，有担心认为如果不能及时获得欧式压水反应堆(EPR)订单，阿海珉核能就会开始流失核心员工²⁷，而EPR设计也将过时²⁸。并且阿海珉核能也需要一个“橱窗”来展示其EPR技术，而奥尔基洛托3号就是这个“橱窗”，可以为其他订单提供参考。在客户的要求下，并作为额外的鼓励，阿海珉核能为奥尔基洛托核电站承诺“交钥匙”或固定价格模式。除了供应“核岛”，它还会负责核电站的工地管理和建筑施工。这并不是阿海珉核能习惯承担的角色。阿海珉核能的前身是法马通(Framatome)公司，它供应过核岛的58

座法国压水反应堆(PWR)，包括法国、中国以及南非在内的境外工程，都是由法国电力公司(EDF)提供以上服务的。

正如其他文件记载的那样²⁹，奥尔基洛托工程自从开工以来出现了严重的错误。据悉，2009年3月为止³⁰该工程已延期至少3年，超预算17亿欧元³¹。2009年8月，阿海珉核能承认预期成本已达53亿欧元，按1欧元等于1.35美元的普通汇率算，这相当于4500美元/千瓦³²。阿海珉核能与其客户芬兰电力公司(Teollisuuden Voima Oy, 简称TVO)之间也存在着严重的合同纠纷。阿海珉核能声称TVO不履行合同，向其索赔10亿欧元。TVO则于2009年1月反诉阿海珉核能，以工程延期为由向其索赔24亿欧元³³。

造成工程延期和预算超额的所有问题不可能全部解决；最终成本会远超过预期。阿海珉核能和TVO之间的诉讼和反诉讼的仲裁将决定超出的成本如何分摊。然而无论如何，投资者的重点是核电站成本和交付时间。

3.2 弗拉芒维勒核电站

法国电力公司(EDF)最终于2007年1月订购了一座EPR反应堆，将建在弗拉芒维勒。这座反应堆的发电定额达1630兆瓦³⁴，在2007年12月开工建设³⁵。2006年5月，EDF预计造价将为33亿欧元³⁶。

23 项目总监马丁·兰特曼表示：“按2003年汇率计算，奥尔基洛托3号包括交钥匙合同在内的整体投资，约为30亿欧元。除此之外没有其他公开数字。”给麦克·施奈德的私人沟通电子邮件，2004年10月8日。

24 原子核周刊，《执行委员会调查声称奥尔基洛托贷款担保为国家补助》，2006年10月26日。

25 原子核周刊，《阿海珉透漏奥尔基洛托3号合同价格增加47%》，2009年3月5日，第1页。

26 原子核周刊，《巨型EPR将具有竞争力：明年EDF决定订单》，1998年11月6日，第1页。

27 石油经济学家杂志，《法国考虑核未来》，2001年3月。

28 原子核周刊，《管理当局警告：EPR安全性许可将于2002年到期》，1997年3月6日。

29 托马斯，《英国能否建立核电站，在没有公共补贴和担保的情况下？》，“商业核能不稳定，碳限制着世界的发展”会议发言。该会议由防扩散政策教育中心和自由欧洲/自由电台合办，2008年17日至18日于捷克布拉格举行。

30 原子核周刊，《阿海珉的奥尔基洛托3号经理声称工程被低估》，2009年3月26日，第4页。

31 原子核周刊，《阿海珉透漏超预算47%》。

32 原子核周刊，《奥尔基洛托3号预计损失增长，阿海珉寻求改变》，2009年9月3日。

33 法新社，《芬兰法建反应堆遭受挫折困扰》，2009年1月30日。

34 原子核周刊，《EDF预计弗拉芒维勒3号EPR NSSL，预计2012年启动》，2007年1月5日，第1页。

35 原子核周刊，《弗拉芒维勒3号混凝土浇注标志核建设开始》，2007年12月6日，第3页。

36 原子核周刊，《EDF将建造弗拉芒维勒3号，将是第一座可与CCGT竞争的EPR》，2006年5月11日，第1页。

当时1 欧元等于1.28 美元，换算成美元相当于2590 美元/ 千瓦。然而，这一造价并不包括第一燃料，因此隔夜成本在某种程度上会高一些。此外，这一估价也不包括融资成本。

EDF 没有要求签订交钥匙合同来执行建筑工程和管理涡轮发电机。至于这一决定在多大程度上是受了奥尔基洛托糟糕经验的影响，又是在多大程度上受维持内部技能需求的影响，我们不得而知。

2008 年5 月，法国安全管理机构暂时停止了弗拉芒维尔的建设，原因是灌注混凝土块环节存在质量问题³⁷。由于这次延

误，承包商阿海珐核能预计核电站将推迟一年，2013 年才能完成。然而在2008 年11 月，EDF 宣布延误可以弥补，核电站时间表恢复到最初的2012 年³⁸。EDF 承认，弗拉芒维尔预期建造成本由33 亿欧元增至40 亿欧元³⁹。当时等于3265 美元/ 千瓦（1 欧元等于1.33 美元），远远超过奥尔基洛托合同价格，不过远低于美国水平和奥尔基洛托实际造价。相关贸易协会则声称，弗拉芒维尔核电站的建设至少会延期2 年⁴⁰。一位阿海珐官员暗示，如今一座EPR 反应堆的造价至少为45 亿欧元，不过没有明确指出这是否指隔夜成本⁴¹。

37 原子核周刊，《弗拉芒维尔3 号发现问题，混凝土浇灌停止》，2008 年5 月29 日，第18 页。

38 原子核周刊，《EDF 确认弗拉芒维尔3 号预计2012 年开始运营》，2008 年11 月20 日，第1 页。

39 美联社世界流，《EDF 将引导核电投资500 亿欧元》，2008 年12 月4 日。

40 原子核周刊，《法兰西联盟：弗拉芒维尔3 号延期》，2010 年1 月28 日，第1 页。

41 原子核周刊，《阿海珐高层称新EPR 成本增加，超额65 亿美元》，2008 年9 月4 日，第1 页。



4. 美国的规划

布什政府通过努力，在其2002年2月公布的“核能2010规划”中重新启动了核订购计划。订购的重点是改良式第三代核电站设计。这一决定宣布时，预计到2010年至少会有一个改良式第三代核电机组和一个更先进设计的反应堆投入运营。在这项计划下，美国能源部预计与核电行业开展合作项目：

“……通过早期场地许可 (ESP) 程序获取核管理委员会 (NRC) 的批准，选取三个地址建造新的核电站，开发施工和运营复合证书 (COL) 的申请指南，并解决 COL 的监管问题。COL 是“一站式”的审批流程，在建厂前就需要解决核电站公共卫生问题和安全顾虑，然后核管理委员会批准并颁发执照准许建造和运营新的核电站。”⁴²

此外：

“……完成改良式第三代反应堆的技术开发工作，并示范和验证联邦政府关于新核电站选址、建设和运营方面的监管流程和许可流程。”⁴³

“核能2010规划”的基本原理是，新核电的设计应在经济上具有竞争性。然而，美国20世纪八九十年代建造核电站的糟糕经历意味着，公共电力公司不愿意订购核电站，除非有充足的证据表明新的设计和流程可以解决过去的问题。因此，克服这些障碍的政策可以包括简化监管流程，确保新设计能获得监管机构的批准，并为三个项目（也许为六台机组）提供补贴（之后的订购就不需要补贴了）。

⁴² <http://www.ne.doe.gov/NucPwr2010/NucPwr2010.html>

⁴³ 美国能源部，《美国2010年前发展核电站路线图》（华盛顿，美国能源部，2001年）。

最初政府提议对至少三个项目提供4.5亿美元的补贴。有三大机构凸显出来,获得了这些补贴,其中有两家机构与美国能源部签订了协议开发施工和运营复合认证(COL)。Nustart成立于2004年,由八家美国电力公司组成,包括安特吉(Entergy)、联合能源(Constellation Energy)、杜克电力(Duke Power)、爱克斯龙(Exelon)、佛罗里达电力公司(Florida Power & Light)、进步能源(Progress Energy)、南方电力公司(Southern Company)和田纳西流域管理局(TVA,提供人力资源而非资金)。法国电力公司(EDF)以及核电站供应商西屋电气和通用电气也是该组织成员,但没有投票权。Nustart计划为两个项目申请补助金,一是位于安特吉的德克萨斯州大海湾核电站(Grand Gulf),该电站使用的是由通用电气负责建造的ESBWR反应堆(经济简化型沸水反应堆),二是位于田纳西流域管理局的贝尔丰特核电站,该电站使用的是由西屋电气建造的AP1000反应堆。另一个主要集团是受电力公司多明尼(Dominion)领导。多明尼公司试图为北安娜(弗吉尼亚州)的升级版加拿大重水铀反应堆(Candu)设计,即ACR-700,申请施工和运营复合认证(COL),在北安娜(弗吉尼亚州)多明尼公司还运营着两座反应堆。然而,2005年1月,多明尼宣布用通用电气的ESBWR取代ACR-700,因为加拿大重水铀反应堆(Candu)核电站在美国获得许可的预期时间太长。目前,Candu设计尚未在美国获得监管机构的批准,核管理委员会预计它的审批流程可能会持续60个月以上,比改良式第三代PWR(压水堆)和BWR(沸水堆)所需的审批时间都要长很多。随后,事实表明,所有

正在接受核管会审核的新设计的审核时间都需要60个月以上。

自从2005年能源政策法案(EPACT)颁发以来,“核能2010规划”的进展没有跟上时间表,但其范围扩展了,适用于众多对建造核电站有兴趣的美国电力公司,而且政府支持的幅度也大幅增加了。到2009年年初,美国宣布计划建造31台核电机组(见表9)。

随后,美国提出对少数示范机组给予一揽子的补助,事实证明其中两项补助最为重要:

——**生产税收优惠**:为了使新核电站生产的电力可与其他形式的能源竞争,新核电站运营的前8年可获得18美元/兆瓦小时的税收补助。根据美国能源信息管理局(EIA)统计,这项补助到2025年为止将花费纳税人57亿美元⁴⁴。

——**贷款担保**:为了消除新核电站融资方面的困难,美国政府提供贷款担保,以便电力公司可以以政府国库券利率贷款。国会预算办公室推断,核电业贷款拖欠风险将会“远高于50%”⁴⁵。国会研究事务处估计,如果贷款担保覆盖六到八座核反应堆建设成本的50%,那么纳税人需支付140—160亿美元⁴⁶。

能源政策法案提供5亿美元的风险保险用于1号和2号机组,2.5亿美元用于3号至6号机组。如果是由于拥有许可证者以外的因素延误了核电站的许可过程,那么应该获得保险赔付。法案还为价值8.5亿美元的研发基金提供支持,并为价值13亿美元的退役成本提供帮助。

44 美国能源部,《2003年能源会议账单的五项条款分析》(华盛顿:美国能源信息管理局,2004年),第3页, [http://tonto.eia.doe.gov/FTP/ROOT/service/sroiaf\(2004\)01.pdf](http://tonto.eia.doe.gov/FTP/ROOT/service/sroiaf(2004)01.pdf)

45 国会预算办公室,《2003年能源政策法案第14章成本估算》(华盛顿:国会预算办公室,2003年5月7日), <http://www.cbo.gov/doc.cfm?index=4206>

46 国会研究事务处(CRS),《能源政策法案第14章核电站补助潜在成本(2003年5月7日):应参议员罗恩·怀登要求。

表 9 “核能 2010 规划” 中美国的核项目

核电站	所有人	核管会状态	贷款担保	设计	预计上线时间
卡尔弗特悬崖 (Calvert Cliffs)3 号	Unistar	08 年 3 月递交 COL 申请	入围	EPR	?
南德克萨斯 (South Texas)3 号、4 号	NRG	07 年 9 月递交 COL 申请	入围	ABWR	?
贝尔丰特 (Bellefonte) 3 号、4 号	田纳西流域管理局 (TVA)	07 年 10 月递交 COL 申请	不符合条件	AP1000	?
北安娜 (North Anna) 3 号	多明尼	07 年 11 月递交 COL 申请	申请	ESBWR	?
李 (Lee)1 号、2 号	杜克	07 年 12 月递交 COL 申请	申请	AP1000	2010—23
哈里斯 (Haris) 2 号、3 号	进步能源	08 年 2 月递交 COL 申请	未申请	AP1000	2019—20
大海湾 (Grand Gulf) 3 号	安特吉	08 年 2 月递交 COL 申请	申请	ESBWR	暂停
沃格特勒 (Vogtle) 3 号、4 号	南方电力	08 年 3 月递交 COL 申请	入围	AP1000	2016
夏日 (Summer) 2 号、3 号	斯堪纳集团 (SCANA)	08 年 3 月递交 COL 申请	入围	AP1000	2016—19
卡拉维 (Callaway)2 号	Ameren UE	08 年 7 月递交 COL 申请	申请	EPR	暂停
里维 (Levy)1 号、2 号	进步能源	08 年 7 月递交 COL 申请	申请	AP1000	2019—20
维多利亚 (Victoria) 1 号、2 号	爱克斯龙	08 年 9 月递交 COL 申请	申请	ESBWR	暂停
费米 (Fermi)3 号	底特律能源 (DTE Energy)	08 年 9 月递交 COL 申请	未申请	ESBWR	?
科曼奇峰 (Comanche Peak)3 号、4 号	德州公用 (TXU)	08 年 9 月递交 COL 申请	第一替补	APWR	?
九哩点 (Nine Mile Point)3 号	Unistar	08 年 10 月递交 COL 申请	申请	EPR	暂停
贝尔班德 (Bell Bend)	宾夕法尼亚电力照明公司 (PPL)	08 年 10 月递交 COL 申请	申请	EPR	2018
阿玛里洛 (Amarillo) 1 号、2 号	阿玛里洛市	?		EPR	?
里弗本德 (River Bend)	安特吉	08 年 9 月递交 COL 申请	申请	ESBWR	暂停
艾尔摩 (Elmore)	Unistar	?		EPR	暂停
土耳其点 (Turkey Point)6 号、7 号	佛罗里达电力照明公司 (FPL)	09 年 3 月递交 COL 申请	?	AP1000	2018—20

来源：众多新闻报道

注：关于各个项目的更多细节参见附录 4。

很快，事实清楚地证明，贷款担保是一揽子补贴的关键要素，但是贷款担保所覆盖的范围不足以促使电力公司下订单。最初联邦贷款担保有望覆盖多达80%的项目债务，如果债务占核电站建设成本的60%左右（其余来自股权融资），这意味着核电站的一半成本都会被覆盖。电力公司成功游说政府100%覆盖占项目成本80%的债务。银行也表达了他们对于百分百覆盖的呼吁。2007年，六家华尔街最大的投行（花旗集团、瑞士信贷、高盛、雷曼兄弟、美林、摩根斯坦利）共同签署了一份面向美国国防部的声明，表示他们不愿意向新建核电站放贷，除非纳税人承担100%的风险⁴⁷。

2007年，六家华尔街最大的投行共同签署了一份面向美国国防部的声明，表示他们不愿意向新建核电站放贷，除非纳税人承担100%的风险。

有些州电力市场自由化程度较低，电力公司在管制关税制度下运营，其资产也受监管，在这些州贷款担保就不太活跃。如果监管者同意（有些州已经同意），允许电力公司在核电站完工之前就开始回收核电站的建造成本，那么建造风险将从电力公司大大地转嫁到消费者身上。这也意味着，如果核电站必须在市场中进行竞争的话，投资方会提供很低利率的贷款。

补贴的适用范围也在扩大，不仅为三个核电站（六台机组）提供补贴，还为每种“创新”设计的三台机组提供贷款担保，截至2008年，有五种合格的“创新设计”正在通过核管理委员会的审批。这意味着，多达15台机组将有资格获得贷款担保。这五个设计分别是西屋电气的

AP1000、通用电气—日立的ESBWR、通用电气—东芝的ABWR⁴⁸、阿海珐核能的EPR以及三菱的APWR。

2002年，“核能2010规划”实施之际，核电站的预计建设成本仍为1000美元/千瓦，对于六台约为1400兆瓦的核电机组来说，如果贷款担保覆盖每台机组成本的50%，那么总共需要42亿美元。但是到了2008年，如果假设15台机组有资格获得贷款担保，且贷款担保覆盖其每台机组成本（6000美元/千瓦）的80%，那么所需贷款担保将超过1000亿美元。

2007年通过的能源法案给予美国能源部2008/09年度185亿美元的预算，用于核电站的贷款担保。2009年2月，能源部选出了五个项目进入贷款担保候选名单，它们分别是南方电力公司（沃格特勒核电站）、南卡罗来纳电力和天然气公司（夏日核电站）、联合之星核能公司（卡尔弗特悬崖核电站）、NRG（南德克萨斯核电站）以及科曼奇峰核电站。这一名单随后在2009年5月缩减至四个项目，科曼奇峰项目降级为第一替补。附录4详细描述了美国宣布的核能项目目前的状态。

4.1 可能的结果

美国核管会正在审查的反应堆设计全部出现了重大的问题。过去十年APWR（改良型压水反应堆）在日本接近达成商业订单，但是出于未知原因，订单一直

⁴⁷ 投资方对美国能源部法案制定提案通知的回应，2007年7月2日。

⁴⁸ 东芝可能也在通用电气—日立之外独立供应ABWR。

未能实现。在美国,只有一个客户使用APWR(改良型压水反应堆),如果该项目不能进展下去,而日本订单又继续拖延的话,这项技术的前途将十分渺茫。

世界上除美国之外,其他国家对ESBWR(经济简化型沸水反应堆)都不太感兴趣,但从2008年以来ESBWR失去了五个美国客户中的三个。这些客户对其建造成本不确定性和设计的商业化程度都不看好,提出很多负面评论。ESBWR仅剩的两个客户(多明尼和底特律能源)没有入围贷款担保。如果这些订单失败,ESBWR将难以生存;如果这些订单没有失败,通用电气作为反应堆的销售商,其未来的发展也还是个问题。

ABWR(改良型沸水反应堆)只有一个客户(NRG),而该项目在2009年末由于成本不断攀升,也经历了严重的困难。作为已经获得核管会管理许可的技术,它具有强大的优势,然而这一许可将于2010年到期,因此新订单不得不等待许可证的更新。核管会还没有关于设计修改变化和实施方面的指示,例如在空袭防护方面。如果变化范围很广泛,审核设计改变的过程很冗长,那么ABWR作为已被批准的技术的优势就会消失。

受奥尔基洛托核电站(以及弗拉芒维勒核电站)问题的牵连,以及难于与欧洲安全管理当局协调解决控制和测量问题,EPR(欧式压水反应堆,又称渐进型动力堆)的形象受到严重破坏。六个EPR项目中有三个项目似乎已经被冻结,只有卡尔弗特悬崖(Calvert Cliffs)项目进展良好。

AP1000似乎处于最强的位置。已宣布的反应堆中有近一半(31座中的14座)使用的是AP1000设计,在进入贷款担保短名单的四个项目中也有两个项目使用的是AP1000设计,其中就包括最有可能第一个获得贷款担保的沃格特勒项目。目前还没有任何AP1000项目被终止或抛弃,尽管目前TVA的贝尔丰特项目有一些问题。AP1000已于2006年获得核管会的设计许可,不过西屋电气/东芝随后递交了设计更改申请,对设计更改的审核可能要等到2011年才能完成。西屋电气/东芝在大西洋两岸在解决电机端罩安全问题方面遇到了一些困难。2010年2月,英国核安全管理局对这一设计方案提出了“监管问题”⁴⁹。

截至2009年底,美国政府已经支付的185亿美元贷款担保很有可能只用于两个项目。而电力公司在接受这些贷款担保时又应该支付什么费用呢?这个问题目前还没有明确。考虑到贷款担保是一项十分有效的保险政策,“保险费”应该反映违约风险。美国国会预算办公室估计净违约风险为25%(违约风险为50%,但是可通过廉价出售仪器收回一半成本)。如果电力公司贷款100亿美元用于一个双机组项目,恐怕不大可能仅仅为了获得贷款担保就愿意支付25亿美元的费用。能源公司要求费用率为1%⁵⁰,不过这似乎又不可能被政府接受。

2010年2月,奥巴马政府在其2011年预算中批准将贷款担保由185亿美元增加至545亿美元(也许足够12台机组使用)⁵¹。2010年2月,美国能源部宣布将83.3亿美元贷款担保用于沃格特勒(佐

49 如果监管问题没有在一定的时间范围内(在此事中)得到解决,安全当局可能拒绝向这项设计给予通用设计认可。

见<http://news.hse.gov.uk/2010/02/16/hseraise-regulatory-issue-ri-against-westinghouses-ap1000-nuclear-reactor-design/>

50 电力机构周报,《能源部担保项目变革激励核电种子选手,费用多少仍是问题》,2009年12月14日。

51 美联社:《关注奥巴马2011年政府机构预算》,2010年2月1日。

52 盛顿邮报,《奥巴马将赞助核反应堆》2010年2月17日。

治亚州) 核电站的两台AP1000机组⁵²。这些贷款担保有望覆盖成本的7% (至少对于其主要所有人, 佐治亚电力公司来说), 但获取贷款担保需要付出的费用细节仍未确定。因此核电站预期成本是119亿美元左右, 或者说5000美元/千瓦。佐治亚公共服务委员会已经接受了佐治亚电力公司的请求, 允许其从垄断消费者收回建造成本 (见附录4)。所以贷款给这个项目的银行有双重保护: 一是联邦政府

(纳税人) 的贷款担保, 二是通过消费者的成本收回保障。

这一双重保护模式显示, 如果政府乐于提供大量的充足的补贴, 是可以建造起核电站的。然而, 该模式对于示范反应堆以外的反应堆却似乎不可持续, 特别是如果项目进展不够顺利, 纳税人和消费者要被迫支付额外费用。

5. 英国的规划

英国政府项目与美国政府项目立足的角度截然不同。英国政府从未声称核能比化石燃料更有竞争力，但是如果碳的价格为36 欧元/吨，那么核能的竞争优势就显而易见了。因此，如果有一些非金融性的扶持政策，尤其是针对设计过程和设计方案认证方面，则各电力公司就可以在没有政府补贴的情况下下订单了。2008 年，当英国政府再度审视本国核能经济时，它认为英国核工业的建造成本为1250 英镑/千瓦（2000 美元/千瓦），比2002 年实际增长了20%。⁵³

英国的核监管部门——核设施监察局（Nuclear Installations Inspectorate, NII）在2007 年开始对四种核电站设计进行审查，这四个设计分别为：西屋电

气/东芝AP1000、阿海珐核能公司的欧式压水反应堆（EPR）、通用电气—日立核能公司的经济简化型沸水反应堆（ESBWR）和加拿大的重水核反应堆设计即ACR-1000（这是一款升级版的加拿大重水铀反应堆）。理论上将有三种设计会最终获得批准，供各核电力公司选择。大多数研究者认为，各电力公司都会选择欧式压水反应堆和AP1000，事实也确实如此。ACR-1000 很快就被撤销了，而在2008 年末，经济简化型沸水反应堆也被撤销了。

英国核设施监察局的人力资源严重不足，很难招收到足够多的审查员完成工作。到2008 年11 月，与预定目标相比，该机构还缺少40 位审查员（大约20%）。

⁵³ 商务、企业和管理改革部，《面对能源挑战：核能白皮书》 Cm 7296，皇家文书局，伦敦，第61 页。
<http://www.berr.gov.uk/files/file43006.pdf>

到2009年7月，人员短缺现象更加严重，共缺少54位审查员（24%）。⁵⁴一些在英国运营的电力公司，尤其是法国电力公司，声称他们希望能在没有政府补贴的情况下订购核电站。

但现实情况是，为了留出足够的时间给监管部门审批核电站的设计方案和选址，一般来说，订单至少要5年之后才能执行。目前，共有三家电力公司承诺在英国下订单，他们分别是法国电力公司、莱茵集团（RWE）和意昂集团（E.ON）。其中，莱茵集团和意昂集团组成了一个企业联盟。法国电力公司在2008年以150亿欧元的价格收购了英国能源公司（英国的一家核电站制造公司），而另一方面，莱茵-意昂联合公司也于2009年耗资数亿欧元购买核电站厂址，与现有核电站毗邻。法国电力公司公司和莱茵-意昂企业联盟各订购4座机组，总产能预计达10GW到12GW。法国电力公司可能会预定欧式压水反应堆，而莱茵-意昂企业联盟还没有选择供应商。

5.1 可能的结果

虽然英国政府在2009年郑重承诺要振兴英国核工业订购业，但这并不能保证当订单真正实施时，英国政府的承诺还会依然如此有力。在2009年，法国电力公司以150亿欧元收购了英国能源公司，并为英国核工业订购业的振兴而作出承诺。这150亿欧元的价格远远超过英国能源公司的资产价格，除非有新的核电站订单，否则这次收购是不合乎逻辑的。

2002年，英国能源公司破产，其原因是，该公司的边际运营成本（那时约为16英镑/兆瓦时）比每单位的电力价格

还高。从那以后，核工业的运营成本就一直呈上升趋势。到2008年9月，运营成本已经上升为41.3英镑/兆瓦时。由于当时电力批发价格较高，英国能源公司在当时的电力批发价格为47英镑/兆瓦时，因此英国能源公司当时刚好能偿还所有债务。但如果运营成本继续上升或电力批发价格有所下降（到2009年末，电力批发价格远低于2008年高峰时期的价格），英国能源公司可能又有倒闭的危险了。从理论上来说，法国电力公司完全可以放弃收购英国能源公司（法国电力公司是通过其全资子公司Lake Acquisitions来收购英国能源公司的），但是从政治角度来说这是不可能的。另一方面，莱茵-意昂企业联盟投资数亿的期权英镑来购买核电站建造地址，但如果没有采取期权方式的话，那么他们就可以极低成本退出英国核工业项目。

到2010年初，英国还要再过三到四年的时间才能完成核电站设计方案的安全性评估和某些选址的审批，之后，核电站订单才能落实。到那时，其他技术选择，如可再生能源和能源效率技术，很可能还不成熟而无法使用。那时，英国政府就只能建立核电站来保证发电，而那种情况下，政府就只能无条件满足电力公司提出的各种要求了。

2010年2月，英国政府实施的“非补贴”政策首次显现出了大的缺陷。英国能源大臣埃德·米利班德（Ed Miliband）这样对泰晤士报说道：⁵⁵

“Neta系统（英国的批发市场，电能通过协议进行贸易买卖或进行能源交换），没能给予风能发电站和核能发电站足够的保障。他说，要改变这种情况，一种选择是回归“产能决定收入”的制度。在这种“产能决定收入”的制度中，发电

⁵⁴ 核能监管委员会内刊，《英国核设施监察局观察：招聘困难时期到了》，2009年7月20日，第9页。

⁵⁵ 泰晤士报，《工党准备撕毁12年的能源政策》，2010年2月1日。

站的发电量越大，产能越高，其收入就越高。确立这种收入制度是为了给可再生能源和核能投资者提供更多的信心。”

一天后，英国国家经济能源管理部门宣布：⁵⁶

“目前，全球金融危机、严格的环保目标、不断增长的汽油进口依赖，以及老化发电站的关闭，使得公众开始质疑当前的能源工业结构能否安全、可持续地提供能源[……]。目前，越来越多的人认为，保

持现有的能源市场结构和其他的相关激励不变是不可行的。”

如果这两段话的结论是，无论核电站是否运行，不论批发市场是否是计划性的市场系统，核电站都将会获得大量的“产能性收入”，这样核电站的运营商都会得到足够的保障（被消费者保障），从而核电站的经济风险也将降低，进而使得核电站的融资成本更低。

⁵⁶ 天然气电力市场办公室，《我们要采取行动，来保证英国能源市场的安全供应》，媒体报道，R5，2010年2月，<http://www.ofgem.gov.uk/Media/PressRel/Documents/1/Ofgem%20-%20Discovery%20phase%20II%20Draft%20v15.pdf>.



6. 德国

德国共有17座核电站。2002年，德国议会通过了一项关于逐步停止使用核电站的法案。该法案规定，在平均运营32年之后，核电站应被关闭。但是，德国电力公司的总“核电站产电量预期”为26230亿千瓦时（相当于全世界一年的核电站产电量），因此，各电力公司只能把未完成的产电量从一个核反应堆转移到另一个反应堆上，由后者继续完成。迄今为止，共有两台核电机组（Stade和Obrigheim）被关闭了。第三台机组（Mülheim-Kärlich）自1988年就进入一个长期的关闭流程，现在也终于被永久性的关闭了。目前，在德国，禁止新建核电站的建设和对核废料进行再处理（超过到2005年6月30日止运输到核废料再处理厂的数量）。

一些人期待2009年9月新成立的默克尔政府能取消逐步停止使用核电站的法律，甚至订购新订单。然而，由基督教民主联盟（Christian Democrats, CDU）领导，自由民主党（Free Democrats, FDP）和基督教社会联盟（Christian Social Union, CSU）组成的新一届联合政府对法律修订十分谨慎。新政府表示，可能会延长现存核电站的使用寿命，但不会取消废除核电站政策⁵⁷。但政府承诺到2010年秋，有关部门会展开一次能源政策的评审会议，综合各种因素审视当前德国的能源环境，并提出政府的战略，包括是否收回废除核电站的政策。

虽然很明显，德国两家主要的电力公司——莱茵集团和意昂集团——都想建立新的核电站，但它们目前的首要目标是

57 原子核周刊，《信任德国政府要将核能政策决议拖延至2010年末》，2009年11月5日。

保持现有核电站的正常运营。如果政府不改变其政策的话，2010年又会有两座核电站——Neckarwestheim 1 和 Biblis A——关闭。如果延长现有核电站的使用年限，那么就可以收回前期投入的资本成本（如果不需要进行大规模的维修或升级的话），而且，到那时，这些核电站所生产的电力的价格将会非常便宜。德国经

济学家沃尔夫冈·裴芬伯格（Wolfgang Pfaffenberger）预测，如果将目前17座核电站的使用寿命延长至60年，那么带来的额外利润将高达2000亿欧元⁵⁸。现在，德国政府也很为难，如果政府允许延长核电站的运营时间的话，则一定要努力从法律上证明“使用”这笔意外之财的合理性。

58 原子核周刊，《更长使用寿命带来更多税收，新任德国政府动机》，2009年12月4日。



7. 其他市场

虽然很多国家都对建立核电站表示了兴趣，但从“表示兴趣”到采取实际行动的时间间隔会很长，而且在这段时间中，这些项目很可能会中断。因此，在这一节里，我们主要关注的是：具有重要代表性的国家（尤其是意大利），已提出招标的国家（如南非和加拿大），和正在努力重启已搁浅核电站项目的国家。

7.1 阿拉伯联合酋长国

2009年12月，韩国击败了法国电力公司所领导的企业联盟（其成员还包括天然气苏伊士集团GDF Suez和阿海珐，该联盟主要使用EPR技术）和通用电气—日立核能联合公司（未指定使用何种技术），成功获得了阿拉伯联合酋长国4座

AP1400核反应堆订单⁵⁹。合约规定，由韩国电力公司负责建造和运营核电站。这四座核电站中，第一座核电站将于2017年在某地投入使用，最后一个预计投入使用时间是2020年。韩国九州电力公司（Kyushu Electric Power Company, KEPCO）将负责核反应堆的设计、制造和维护。同时，该公司也会将一些项目转包给其他的设备供应商，如现代（Hyundai）、斗山电子（Doosan）和三星（Samsung）。据说该合约价值204亿美元，但具体的交易条款和规定还不是很清楚。此次韩国的竞标价格比法国低160亿美元，而据报道，通用电气—日立核能联合公司提出的报价更高⁶⁰。此次合约似乎并不是整个项目的“交钥匙”（固定价格）合约。实际上，核电站完工后将由韩国与阿联酋联

59 韩国先驱报，《韩国的核工业取得新的里程碑》，2009年12月28日。

60 正确视角新闻，《阿联酋：中东引导核电站订购的复兴》，2010年1月12日。

合上市公司来经营，而韩国方面将在该联合公司中保留一部分股权⁶¹。但目前尚不清楚，将采取何种方式融资来建造这些核电站。

但该项目似乎很容易出问题：

- 该项目所用的技术还未经检验：目前只有一年的建造经验可供参考；
- 阿联酋当地的核技术十分匮乏；
- 工程完工时间很难保证，根据美国资深电力公司的经验，该合约中的价格似乎比成本低40%；
- 韩国核工业从未有过为外国供应核反应堆的经验；
- 阿联酋核电站的配套基础设施很不完善（例如，到2008年末，阿联酋才建立起自己的核工业安全监管部门）。

7.2 南非

从1998年以来，南非一直寄希望于球床燃料反应堆（Pebble Bed Modular Reactor, PBMR）项目上。但是，到2006年，人们发现该项目前景并不乐观。最好的情况是PBMR项目会被延期开发，最坏的情况是该项目根本不可行。现在，即使是作为试点核电站，PBMR核电站也不可能在2020年之前开发了。基于上述情况，南非国有电力公司（Eskom）也不再订购这种核反应堆了。

虽然很多国家都对建立核电站表示了兴趣，但从“表示兴趣”到采取实际行动的时间间隔会很长，而且在这段时间中，这些项目很可能会中断。

之后，南非政府与Eskom公司开始探讨所谓的常规核电站项目。但是，与PBMR一样，在该项目中，他们对于核电站使用年限和成本的估计依然不切实际。2006年，⁶²南非政府预计一台新的核电机组将在在2010到2012年之间上线投入使用。

2007年中期，虽然第一台核电机组的完工时间被延期至2014年，但Eskom公司还是将目标定为到2025年完成200亿瓦产能的核电站建设项目⁶³。其中，预计建造成本为2500美元/千瓦。2007年11月，Eskom公司公开招标核电站供应商，计划在短期内建造完成核电产能32—34亿瓦，到2025年，实现产能200亿瓦。2008年1月，该公司收到了两份投标。其中一份来自阿海珐公司，提出两个EPR型核反应堆完成短期目标（再加上10个EPR型核反应堆以完成2025年目标），另一份来自西屋电气公司，提出三个AP1000型核反应堆完成短期目标（再加上17个AP1000型核反应堆以完成2025年目标）⁶⁴。两份投

标都自称是采用“交钥匙”合约方式，但他们是否真的指采用固定价格的“交钥匙”合约，还是指只对整个核电站的“交钥匙”合约还不清楚。

后来，据说这两份投标的价格大约为6000美元/千瓦，比预计价格高两倍以上⁶⁵。因此，尽管欧洲共同市场家族组织联合会（Confederation of Family Organizations in the European Community, COFACE）及法国政府的贷款担保机构称将提供出口信贷担保，但

61 国际石油日报，《韩国企业联盟与阿联酋签订核电站合约》，2009年12月29日。
62 星期日时代（南非），《南非进入核工业》，2006年6月24日。
63 原子核周刊，《Eskom公司计划新核电站，内阁思考新政策》，2007年6月7日。
64 原子核周刊，《Eskom公司竞标成功，获得2组EPR和3组AP1000的制造权，大手笔》，2008年2月7日。
65 原子核周刊，《成本高涨，各核电站供应商在公布成本预算方便很谨慎》，2008年9月11日。

Eskom 公司还是在2008年12月决定正式取消招标，原因就是投资数额太大⁶⁶，尽管阿海珐公司声称已经解决了85%的融资问题⁶⁷。2009年2月，Eskom 公司也进一步放弃了PBMR项目⁶⁸。虽然现在Eskom 公司仍旧声称将建造核电站，但看起来Eskom 公司似乎在资金方面还是不足的。

《工程新闻》（Engineering News）报道说，其主要问题在于Eskom 公司的信用等级：⁶⁹

“标准普尔评级机构周二表示，事实上，如果保持 Eskom 公司 BBB+ 的投资信用等级，南非国库必须向 Eskom 公司所有的债务提供‘无条件的、及时的担保’。国库依然没有公布具体细节。因此 Eskom 公司董事会已决定停止其商业采购行为，专心挑选 Nuclear-1 核电站建造项目的竞标者。”

历史经验表明，贷款担保并不能保证核工程项目的资金畅通。如果一家电力公司的信用等级有风险，那么其项目就会寸步难行。

7.3 加拿大

安大略电力总局（Ontario Power Authority, OPA）是负责管理加拿大安大略省电力系统的公共部门⁷⁰。2007年，该电力总局认为，可以以大约2900加元/千瓦的成本建立核电站。2008年6月16日，加拿大政府宣布，将在安大略省的达灵顿

（Darlington）建立拥有两台机组的核电站。2009年5月20日，有内部消息称加拿大政府在竞标中已经选定了加拿大原子能有限公司（ACEL）而不是阿海珐公司或西屋电气公司来建造加拿大的第一个核电站，而该核电站的建造工程预计在25年内完成。在加拿大，曾经有两台核电机组预计在2018年投入使用。但是据报道，这两个核电站所在的省政府把工程的每一步进程都建立在联邦政府的贷款担保（用来对冲该项目的金融风险）基础之上，以规避自己的财政风险⁷¹。有三个公司（包括和）参与了竞标，其中有一个来自阿海珐公司，还有一个来自加拿大原子能有限公司，但只有加拿大原子能有限公司的竞标符合要求，也就是供应商应承担建造施工风险。安大略能源与基础设施部部长乔治·史密斯曼（George Smitherman）承认，只有加拿大原子能有限公司的竞标符合省政府的要求，即需要由供应商承担成本超支的全部风险。⁷²

有新闻报道了此次竞标的规模⁷³。报道上说，阿海珐公司没有满足项目的全部要求，其竞标价格为两个EPR型核反应堆236亿加元（210亿美元），即7375加元/千瓦（6600美元/千瓦），而加拿大原子能有限公司满足了项目的全部要求，其竞标价格为两个ACR-1000型核反应堆260亿加元（230亿美元），即10800加元/千瓦（9600美元/千瓦）。后者虽然满足了项目的全部要求，但其竞标价格几

贷款担保并不能保证核工程项目的资金畅通。如果一家电力公司的信用等级有风险，那么其项目就会寸步难行。

66 原子核周刊，《Eskom 公司与原核电站经营商解约》，2008年12月11日。

67 明星报，《核电站竞标有资金支持——阿海珐》，2009年1月30日。

68 PBMR 公司，《PBMR 公司正在考虑改变产品策略》，新闻报道，2009年2月5日。

69 工程新闻，《Eskom 公司宣布结束核能 1 号项目，但南非依然会进入核工业》，2008年12月5日。

70 多伦多明星报，《260 亿的投标被拒绝：安大略放弃了新的高价核电站计划，因为那会扰乱该省 20 年的财政预算》，2009年7月14日。

71 环球邮报，《AECL 支持安大略核电站的建造：来源》，2009年5月20日。

72 原子核周刊，《加拿大关注风险问题，阿海珐公司否认 EPR 成本数据》，2009年7月23日。

73 多伦多明星报，《核电站竞标被拒》。

乎是两年前安大略电力总局预算的4倍。据说,最后一个竞标公司西屋电气公司的竞标价格介于前两家价格之间。因此,并不奇怪,安大略省政府决定暂停招标。

后来,阿海珐公司否认了媒体所报道的竞标价格,但它又不愿意提供其实际竞标价格。据说,该项目又在“隔夜价格”合约的基础上增加了很多条款,其中包括:建造从达灵顿到美国东北部的电力中转和配送设施,以及60年的核燃料价格核电站退役成本等。⁷⁴

此次加拿大原子能有限公司的竞标失败使得公众对其作为核电站供应商能力产生了怀疑。最终,在2009年末,加拿大原子能有限公司宣布出售公司。⁷⁵

7.4 土耳其

在2008年以前的30年中,土耳其一直没有公开招标核电站的承包商。2008年,土耳其开始公开招标核电站承包商,新建产能为30—50亿瓦的核电站。土耳其要求此次竞标者承担核电站的建造费用,同时经营核电站15年,并以一个固定的价格出售电能⁷⁶。这意味着供应商要承担极大的风险。尽管一些供应商如通用电气—日立核能联合公司、东芝/西屋电气、韩国电力和阿海珐公司都对此项目表示了兴趣,但2009年1月竞标结束时(因为无人竞标,招标时限不得不延长),真正投标的只有一家俄罗斯供应商——Atomstroyexport (ASE)。据报道,

这家公司的竞标价格为211.6美元/兆瓦时⁷⁷。随后,一家土耳其国有电力贸易公司TETAS向政府提交报告,认为此次竞标价格过高,因此,实际竞标价格又修订为151.6美元/兆瓦时⁷⁸。2009年11月土耳其政府正式废弃了招标⁷⁹,在当时还面临着土耳其工程院的一些行动被法庭裁决无效的威胁。

7.5 意大利

1987年,意大利举行了一次全民投票。根据投票结果,意大利关闭了其四座现营核电站,同时,也放弃了另一座核电站的建造项目。但之后,贝卢斯科尼政府却又颁布了新的法律,为核电站的重新启动铺垫了道路。2009年2月,法国电力公司与意大利最大的电力公司ENEL签订了协议,最早将于2013年开始建造四座产能为16.5亿瓦的EPR反应堆核电站。

目前,ENEL公司尚未选好核电站的建造地址。据该公司称,每座核电站的成本将大约为40—45亿欧元(59—66亿美元),即3600—4000美元/千瓦⁸⁰。之前,一直有人猜测会由其他的承包商来建造核电站,如由A2A领导的企业联盟,这是一家在米兰的电力公司,供应AP1000型核反应堆,但与这些承包商的项目相比,ENEL的项目要更为先进。⁸¹

7.6 巴西

目前,巴西共有两座核反应堆。第一个是昂格拉1号,是巴西于1970年向西屋

74 原子核周刊,《阿海珐公司否认EPR成本》。

75 环球邮报,《加拿大的核能骄傲结束了》:“由于赤字,保守党正为AECL公司的核反应堆寻求竞标者。加拿大重水铀反应堆核反应堆是加拿大工程历史中的骄傲,其热销引发了人们的担心,担心该技术会离开这个国家”,2009年12月18日。

76 原子核周刊,《通用电气—日立核能联合公司计划投标在土耳其建造ABWR核电站:其他供应商显得很谨慎》,2008年9月11日。

77 原塔斯社英语在线商务新闻,《DJ Atomstroyexport Grp修改了向土耳其核电站竞标的计划——IHA》,2009年1月19日。

78 土耳其日报,《国家运营的TETAS向能源部提交了关于核电站经营商的报告》,2009年6月30日。

79 法国新闻社,《土耳其撕毁了与核电站经营商的合约》,2009年11月20日。

80 原子核周刊,《Enel的目标是,让意大利第一组EPR在2020年投入使用》,2009年10月8日。

81 原子核周刊,《米兰电力公司A2A将成为意大利AP1000核电站建设企业联盟的领导者》,2009年10月22日。

电气公司所订购的。1981年，该核反应堆达到临界状态。1975年，巴西与德国签署了一份合约，计划在15年内建成8座13亿瓦的反应堆。这份合约可能是世界核工业历史上最大的一份订单。然而，其结果却是悲剧性的。由于日益增长的债务压力和军方对于核武器的兴趣，巴西政府实际上放弃了整个项目。只有该项目覆盖的第一个反应堆昂格拉2号在2000年7月投入使用，此时，距其建造开始时间已有24年。昂格拉3号于1991年6月停工。巴西国有企业Eletronuclear曾试图重启核反应堆建造项目，但该计划一直被迫拖延着。据说，巴西核反应堆建造项目在2009年10月又重新启动，并预计将于2015年完工⁸²。2010年1月，阿海珐核能公司向德国政府提交申请，申请从德国信用担保部门Hermes获得价值14亿欧元的贷款担保，以完成昂格拉3号的建造项目⁸³。

除此之外，巴西政府曾预计在2009年末宣布4台新核电机组的建造地点。巴西能源部部长爱迪生·洛堡（Edison Lobao）说，每台机组的成本预计为30亿美元，产能为15亿瓦。这2000美元/千瓦的预测成本似乎很不切实际，因此，对于巴西是否会在接下来的5年内继续订购新的核反应堆，业界深表怀疑。

7.7 东欧国家

这一节中，我们主要关注那些试图重启已搁置核电站项目的国家，如保加利亚、罗马尼亚和斯洛伐克共和国。波罗的海国家、波兰和捷克共和国正在考虑建造新的核反应堆，但到真正的订购还有一段距离。在保加利亚、罗马尼亚和斯洛伐克共和国，已搁置核电站项目的重启工作拖

延了长达10年之久，而至于最后是否能重启以及何时能完工依然是未知数。

7.7.1 斯洛伐克共和国

斯洛伐克计划在莫科夫斯（Mochovce）建造4座前苏联设计的WWER-440型反应堆，但该项目于1990年搁置了。随后，该国又重新启动了其中两台机组的建造项目，并最终分别于1998年和1999年完工。2004年10月，意大利电力公司ENEL收购了Slovenske Elektrarne（SE）公司66%的股份。作为其收购计划的一部分，ENEL公司计划投资约20亿欧元用以扩充发电能力，其中包括完成莫科夫斯的第三和第四台核电机组项目。2007年2月，SE公司宣布将继续完成莫科夫斯第三和第四机组的建造项目，并且决定为此投资18亿欧元。虽然2008年7月，欧洲委员会批准了斯洛伐克核电站项目，但该委员会也同时指出，斯洛伐克核电站并没有使用最近欧洲其他在建核电站所普遍使用的“全封闭”结构，因此要求斯洛伐克核电站的投资方和管理机构对核电站进行改进，增加核电站抵抗小型飞机空袭的功能。尽管斯洛伐克政府不断施压，该核电站的建造项目还是到2009年6月才正式重新启动。目前，第三和第四机组计划于2012年和2013年完工。

7.7.2 罗马尼亚

1980年，罗马尼亚核电站合约签订，该合约计划在塞尔那伏达（Cernavoda）建造5台Candu（加拿大重水铀反应堆）机组。建造工程于1980年开始，但随后，所有努力都集中在第一台机组上，1996年第一台机组建成投入使用。2007年，

82 Esmerk 巴西新闻，《巴西：昂格拉3号核电站开工》，2009年10月13日。

83 日报（柏林），《西门子希望国家支持核能出口》，2010年1月7日。

第二台机组建成。目前，罗马尼亚正计划继续完成另两台机组的建造。另外，罗马尼亚政府计划在SNN电力公司（负责建造、运营和维护核电站）和一个私人投资方之间建立一个独立的电力生产公司。事实证明，该核电站项目融资很困难，工期被不断延后。按原计划，第三和第四台核电机组应分别于2014年10月和2015年中期投入使用。但这样的目标是不可能实现了，目前，第三个核电机组预计最早要到2016年才能完工⁸⁴。

7.7.3 保加利亚

2003年，保加利亚政府宣布了重启北部贝莱内核电站建造项目的计划。贝莱内核电站于1985年开始施工，但由于1989年保加利亚政治变化，该项目也随之搁浅并最终于1992年正式停工。2004年，关于建造完成该20亿瓦核电站项目的招标工作启动了。2006年10月，一个由俄罗斯公司所领导的企业联盟，Atomstroy Export (ASE) 公司中标，获得了这个40亿欧元项目的合约。

为支持贝莱内核电站项目，保加利亚建立了一个贝莱内核电站建造企业联盟。其中，保加利亚国有电力公司NEK占股51%，拥有总体控制权，其他股份则归中标公司所有。2008年末，保加利亚政府

宣布，德国电力公司RWE为该核电站的战略投资者，根据要求RWE公司需投资12.75亿欧元，而且，还需先提供3亿欧元的贷款。随着投资方的确定，上述企业联盟也于2008年12月正式成立，名为贝莱内电力公司。然而，之后不久，RWE公司从该项目撤资，因此到2009年末，该项目的融资工作仍在进行中⁸⁵。

7.7.4 其他国家

2009年，捷克国家控股电力公司CEZ公开招标，要在泰梅林（Temelin，目前已有两座反应堆正在运营）建造两座反应堆，并且在另一个现有核电站杜库凡尼（Dukovany）建造第三座反应堆⁸⁶。据报道，参与此次竞标公司有西屋电气、Atomstroy Export和阿海珐，不过最终结果最早将在2012年初公布。这三座反应堆计划的完成时间分别为2019年、2020年和2023—2025年。

波兰政府表示了建造新核电站的意向，但具体计划仍处于前期阶段。立陶宛政府也有意替换最近到达使用年限的前苏联设计的核反应堆，但缺少项目资金。除非供应商打算购买并经营核电站（就像韩国电力公司在阿联酋做的一样），否则这些国家是不会订购核反应堆的。

84 原子核周刊，《经济危机使罗马尼亚放弃了控股Cernavoda-3和Cernavoda-4核电站的计划》，2009年9月3日。

85 巴尔干商业文摘，《莫斯科正与索菲亚就Belene Nuke的股权问题进行磋商》，2009年12月28日。

86 捷克共和国日报，《捷克承认所有泰梅林核电站的竞争者都进入了第二轮审核》，2010年2月22日。



© Greenpeace / Nick Cobbing

8. 电力公司在核电站建造中的成本预算

近期，关于电力公司在核电站建造中的成本预算案例大部分都来自于美国。这是因为美国的成本预算数据更加可靠，其原因在于，在美国各电力公司需要提供可靠的成本预算数据以获得联邦贷款担保，

同时，可能还要向各州能源管理部门汇报预期发生的费用。但是，有迹象表明，核电站建造成本预算应该再加上三个项目的招标结果和奥尔基洛托、弗拉芒维勒核电站的实践经验。

8.1 美国

表 10 美国核电站的建造成本

核电站	所用技术	成本预算（单位：十亿美元）	成本预算（单位：美元 / 千瓦）
贝尔丰特 3 号、4 号	AP1000	5.6 10.4*	2500 4600
李 1 号、2 号	AP1000	11*	4900
沃格特勒 3 号、4 号	AP1000	9.9	4190
夏日 2 号、3 号	AP1000	11.5	4900
里唯 1 号、2 号	AP1000	14	5900
土耳其点 6 号、7 号	AP1000	15 18	3100 4500
南德克萨斯 3 号、4 号	ABWR	17	6500
大海湾	ESBWR	10+	6600+
里弗本德	ESBWR	10+	6600+
贝尔班德	EPR	13 15	8100 10000
费米	ESBWR	10	6600+

来源：各类媒体报道

标注 * 的预算为隔夜成本，其他的预算则包括利息成本。

表10 列出了美国最新核电站的建造成本。从这张表中，我们可以发现很多特点。首先，大多数成本预算（尤其是那些考虑最周全的）都是针对AP1000 型核反应堆做出的。其原因在于，在众多核反应堆中，只有AP1000 和ABWR 两种型号走完了NRC 的审核过程（虽然之后两款设计又做出了一定的修改），这样其设计方案就与最终方案较为接近，从而更容易进行成本预算。另外，上述成本预算似乎都是20 世纪90 年代核工业成本预算（1000 美元/千瓦）的4 倍以上。而且，到2009 年末，

核电站的建造成本预算一直呈上升趋势。除此之外，很难再从上表中得出说服力很强的结论了。这些成本预算数字的基本组成各不相同：有些包括融资成本，有些包含电力运送成本。因此，不能直接对上述各核电站的成本预算数据进行比对。

8.2 其他国家

表11 列出了最近至少到达招标阶段的各个国家的核电站成本依据。

表 11 美国核电站的建造成本

国家	招标前预算	最低竞标价 / 合约价格	最近估价	状态
南非	2500	6000	—	投标方放弃
加拿大	2600	6600	—	投标方放弃
阿联酋	—	3700	—	等待建造工程开始
法国	—	2700	3300	2008 年 12 月建造工程开始
芬兰		2500	4500	2005 年 7 月建造工程开始

来源：笔者研究

8.3 总结

在过去的十年中，核电站建造成本预算翻了好几番（可能在五番以上），而且尚未显出平稳的迹象。过去的经验表明，一旦核电站建造工程开始，其实际建造成本就会比预算大得多。而更难确定的是，当前的成本预算是否真的显著高于过去的成本，如果是的话，为什么成本会保持如此高速的增长？

距今最近的一座核电站——英国西泽韦尔 B 核电站——没有在建造阶段遇到较大问题，其成本保持在30 亿英镑的范围内，没有超出当前的成本预算，而另一

方面，上世纪90 年代美国核电站的成本也基本与西泽韦尔 B 相同。这种现象的原因可能是，为了应对三哩岛和切尔诺贝利事件引发的安全隐患，之前几代设计都背负了沉重的“包袱”，核电站设计者假定如果新设计抛开这些“包袱”，使用简单又能达到安全标准的设计，可以更便宜并更有效率。当然，事实也可能是上述假设不合理，新设计仍然需要很复杂。另外，为了保护核电站不受空袭影响，建造工程会比预想的更加复杂和繁重。

1000 美元/千瓦的数据可能不是来自于设计学中“从细节到整体”的原理，而

在过去的十年中，核电站建造成本预算翻了好几番（可能在五番以上），而且尚未显出平稳的迹象。

来自于“从整体到细节”的思考模式，即它是能保持核工业的竞争力的价格。简而言之，这1000美元/千瓦是没有技术基础的既定目标。对于为什么建造成本会上升，有很多种解释：⁸⁷

- 中国强大的市场需求导致全球商品价格上升，从而导致所有发电站的成本上升，但由于核电站建造工程量较大，其成本上升幅度最高；

- 生产设备的缺乏，这意味着有意建造核电站的电力公司必须外购很多组件（如压力炉）；

- 核工业技术团队老化而且没有年轻力量补充，导致缺乏必要的核技术

- 美元的缺陷；

- 各电力公司在成本预算上偏于保守。

上述解释乍一看似乎很有道理，但仔细研究就会发现，并不是所有的解释都具有说服力。

- **商品价格。**在过去10年中，很多金属和其他原材料的价格都在显著上升，即所谓的中国效应。但是，金融危机以后，商品价格急剧下降，然而，核电站的预测建造成本并没有随之下降。

- **组件瓶颈和技术短缺。**标准普尔公司⁸⁸强调了核电站组件制造商缺乏的问题。标准普尔公司认为压力炉、循环水泵

和涡轮机锻件的供应问题尤其严峻。世界上只有日本钢铁厂一家公司能制造压力炉的超重型锻件。虽然这些产品的巨大需求无疑会导致生产规模的扩大，但另一方面繁杂的核电站组件检验要求导致供应商不愿建立这种生产工厂，除非能保证对这些组件的长期需求，因此核电站组件公司产能扩大过程很缓慢。标准普尔公司也认为，技术短缺是一个主要的障碍，而且这种短缺不是轻易快速地就能调整的。该公司预测，美国将不得不依赖外国（尤其是法国和日本）的技术支持。

- **货币的不稳定性。**在过去的两年中，美元价值极不稳定，其中，美元对欧元的汇率还曾跌至历史最低。2005年11月到2008年7月期间，美元对欧元的汇率从1=\$1.17跌至1=\$1.57。但到2008年11月，美元汇率又恢复至1=\$1.27。由于一些组件用美元衡量（而不是用欧元衡量）更贵了，因此核电站成本上升部分原因可能是美元的贬值。

- **电力公司的保守主义。**电力公司对其成本预算准确性的意识，以及这种预算是否会导致严重的经济后果都是很难量化的。现在，核电站监管部门和公众都不像过去一样，能容忍核电站的成本超支了，还有奥尔基洛托核电站的经验教训，这些都极大地刺激着电力公司应该留出更多的不可预见的费用。

⁸⁷ 关于这些因素的详细讨论，见标准普尔公司报告，《美国新建核电站的建造成本攀升》（2008年）。

⁸⁸ 同上。



9. 政府补贴的必要性和补贴程度

英国政府在1989年、1995年和2002年的研究得出结论：在一个自由化的电力市场中，没有政府补贴和政府担保覆盖其成本，电力公司不会建造核电站。在那些改变了电力行业垄断情形的国家，上述结论同样适用。最近芬兰核电站的订购明显不符合上述结论，但正如之前所讨论的那样，芬兰的情况较为特殊，该国工业化企业设立了一家不以利润为目的的公司，负责购买该电站的核电，因此其他国家无法效仿。然而，这个项目的实际经验非常糟糕，可能会进一步阻碍竞争性市场中的电力公司继续建造核电站（除非各电力公司能保证完全与市场风险隔离）。

美国振兴核电站订购业的经验表明，振兴的关键在于政府是否给予贷款担保或监管部门是否允许各电力公司从消费者那

里收回核电站成本。这些条件都能保证电力公司以较低利率获得贷款。

核电站建造中能获得政府补贴和担保的部分，一定是那些核电站所有者不能完全控制的部分。这包括：

- **建造成本。**核电站的建造成本较高，而且有明显的成本超支风险。因此，政府可能需要为私人投资者的成本提供担保。

- **经营业绩。**核电站实际业绩不如预测业绩的风险很高。核电站的可靠性很大程度上是在所有者的掌控之中的，但不能确定的是，开发商是否有足够自信，确保能承担可靠性差于预期的风险。

- **非核燃料运营和维护成本。**同样

的，这部分成本也大致在核电站所有者的控制范围之内，他们可能愿意承担这部分风险。

——**核燃料成本。**一般来说，人们不认为核燃料采购是一项有风险的活动。大量储存铀燃料很简单，而且核燃料采购成本价提高的风险能被合理规避。但是，核废料的处置成本（假设核废料不被再处理）则备受争议，核电站所有者可能迫切需要某种形式的处置成本上限，就像美国一样。

——**核电站退役成本。**我们很难预测核电站的退役成本，但可以肯定的是，未来核电站的退役成本一定会大幅上升。建立一项设计良好的独立基金似乎能使上述

风险得到一定程度的控制，尽管如果核电站退役和核废料处理经验显示当前估算明显偏低，或者如果这项基金的投资回报率低于预期回报率，那就必须增加基金的规模。在那种情况下，私人投资者可能就需要对他们的投资进行“担保”。

由于第一批机组在建造过程往往包含新技术成本，因此担保范围更广，且担保额也相对较高。尽管一个国家在推动核电站发展方面的政策不能绝对地保证核电站项目的完工，但如果该国已经建造了一批核电站，并且运营状况良好，那么可能市场就愿意承担更多的风险。人们都应该记得，当年里根政府和撒切尔政府都曾许诺促进核工业的振兴，但实际上却对核能的衰落负有责任。

结论

自基于改良式第三代核反应堆设计的核能复兴计划在20世纪90年代末首次遭到了质疑,在随后的10年里,新核电站经济状况的预期也每况愈下。反常的是,这似乎使得包括美国、英国和意大利等国政府更坚定地推动新核电站的发展了。实际上,这些核电站订购项目与当时的执政者,如布什、布莱尔和贝卢斯科尼等,是密切相关的。

执政者强大的政治背景为核电站的发展提供了强大的推动力,如简化核电站项目的规划程序,以及给予核电站项目公共补贴等,但这也可能是一大弊端。政府换届后,新任领导人也许就不会这么热衷于核事业了。

一些人认为建造核电站是减少温室气体排放的一种主要方法,因此极力推动核电站项目,这是一种明显误导人的观点。目前,电能需求只占能源总需求的20%左右。即使这个比例稍微上升一点,同时核能发电占总电能的比例也提高一些,那么对核能发电的需求占能源总需求的比例也不会超过10%。即便能聚集到足够的物资、技术和经济资源用于核工业发展,使世界核能发电产增加4—5倍,但这同时也会导致很多其他问题,例如铀资源匮乏、核电站选址问题和核废料处理等。

从世界范围内来看,核电站的订购率在30年里一直处于较低水平。在过去的几年中,来自中国、韩国和俄罗斯的订单极大地增加了在建核电站的数量。截止至2010年1月,单在中国就有20座在建核

电站。但是这些核电站大多都由中国国内的供应商所提供,并且使用的技术也比较旧。要使核工业复兴,那么包括美国、英国和意大利在内的诸多核工业市场必须要重新开放。但目前,这些市场距实现核电站订购还有几年的时间,改良式第三代核反应堆也还需要几年才能试运营。

目前来看,强有力的政治支持能够推动核复兴,但如果没有合理的技术和经济基础,政治支持(比如20世纪80年代撒切尔和里根所做的)最终也难撑大局。本文主要关注了核工业中的经济问题,但在这方面,经济与技术因素是相互交叉的。从理论上来说,几乎所有的核电站设计都可以做到满足监管部门提出的安全标准,但这样做的成本却又是让人望而止步的。

现在,新核反应堆设计要获得监管部门的审批,要比想象中的困难得多。美国启动“核能2010规划”,其目标就是到2010年完成改良式第三代核反应堆的设计。但似乎到2010年只有一款设计(AP1000)获得了设计许可,而且即使是这款设计也不得不根据监管部门的修改意见不断修改。到2010年初,人们才清晰地认识到2011年(甚至更晚)之前,这些设计一个也不会通过审批。一些设计上的突出问题,如EPR⁸⁹的操作与测试系统和AP1000⁹⁰的防护设计,其实是可以解决的,但这样做会大大地增加成本并推迟完成日期。

为什么难以预测核电站的发电成本?为什么预测出来的核电站发电成本会倍受质疑?主要有以下三方面的原因:

——涉及到的一些成本和过程变量不能

89 关于具体实例,见《健康与安全行政》,《联合监管机构对于EPR的阐述》,发行号:V4 22/10/2009,2009年11月2日,
<http://www.hse.gov.uk/PRESS/2009/hse221009.htm>.

90 关于具体实例,见核能监管委员会,《核能监管委员会通知西屋电气关于AP1000核反应堆安全设施建设的若干问题》,
<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/news/2009/09-173.html>.

从商业角度证明，如核电站退役和核废料处理，尤其是中等和高等核废料的处理。核电站运营的经验表明，对于这些未纳入商业范畴的过程，其真实成本很容易大大超出预期。因此，有显著低估这些成本的风险。

——某些变量是没有“正确”答案的。如，贴现率的波动范围可以很大；要为核电站的退役留出多少资金也没有统一的答案。

——缺乏可靠的、及时更新的核电站实际运营数据。各电力公司对实际发生的成本数据守口如瓶。另一方面，在过去的20年中，西欧只有几份核电站订单，而北美更是从1980年以来一份订单也没有。因此，所有新一代的核电站设计都还未被检测过。

在过去的40年中，已有核电站的性能与新核电站的预期性能之间一直有很大差别。实际上这些预期性能都是过于乐观的。目前对于下一代核电站性能的预期与当前核电站的性能也有这样的差距。虽然过去的错误预期并不能说明当前的预期是不准确的。但过去的经验表明，基于性能上的较大进步作出的预测并不一定准确，我们要持怀疑的眼光看待。其中涉及到的重要假设包括：

- 建设成本
- 运营业绩
- 非核燃料运营成本和维护成本
- 核燃料成本
- 核电站退役成本

只有政府提供广泛的担保和补贴，才能建造新的核电站。

另一方面，也需要商业担保，以保证核电站所发出的电能够以一个确定价格售出。另外，根据欧盟的竞争法，这种广泛的“政府救助”能否获得批准，还是个未知数。

在核电站的问题上，商业利益与社会利益有很大的冲突。在遥远的未来才会产生的成本（无论有多大大不确定），对商业成本评估而言几乎没有任何影响。同时，国际条款也使得各公司无需承担核事故的风险。因此，从企业角度出发所作出的成本评估必须予以校正，以使其能充分反映更广泛的社会成本。

与1980年出现的核能“第二波”的众多预测一样，目前的“核能复兴”的结果也不会出现大量新增的核电站订单。那些没有出现过核电站订购方面问题的国家会继续订购核电站。但随着核电站成本提高问题日益显现，核废料处理问题尚未解决，以及核电产能的逐步消退，即使是这些国家，对于核电站的热情也会不断退去。

那些“核复兴”国家确实将建造一些核电站，但这只能证明，只有政府准备无视于国内的民主协商结果，为核电站提供大量充足的政府补贴时，核电站才有可能建立起来。然而，大量资金和资源用于建设核电站，而不是用于采购更经济有效的措施以满足能源政策目标，即提供可负担的、稳定的和清洁的能源，或节约能源，真正的损失是由此产生的机会成本，其实过去的几十年都是这样。核电站的成本线一直呈上升趋势。换句话说，不像大多数其他技术一样，依靠学习效应、规模经济和技术进步成本可以降低，核能的成本是

不断提高的。弗洛格特（Froggatt）和施耐德（Schneider）2010 年的研究表明，与核能相比，提高能源效率和发展可再生能源更加划算，这两者的成本曲线是向下

的。⁹¹ 如果将之前投入到核能的资金和资源用于发展能源效率和可再生能源的话，那么现在核能与能源效率和可再生能源之间的经济差距就会更大了。

91 A. Froggatt (和 M. Schneider): 《转型所需的系统: 核能, 还是能效+ 可再生能源? 》为海因里希·伯尔基金会撰写的论文, 2010 年3 月。

附录

附录1 核反应堆技术，现有设计方案和供应商

核反应堆技术

核反应堆可以根据使用的冷却剂和减速剂大致分为几类。冷却剂是指将热能从核反应堆堆芯传送到涡轮发电机的流体（气体或液体）。减速剂是一种能降低中子速度的媒介，能使中子在堆芯中保留足够长的时间，从而使核链式反应能够持续进行。冷却剂和减速剂可以有多种组合，但在目前正在使用或出售的核反应堆中，共涉及四种冷却剂和三种减速剂。

最常见的核电站反应堆类型是轻水反应堆（light-water reactor, LWR），它有两个变种：压水反应堆（pressurised water reactor, PWR）和沸水反应堆（boiling water reactor, BWR）。这类反应堆的设计原理来自核潜艇的推进装置，它使用普通的水（“轻水”）作为冷却剂和减速剂。普通水的优点是便宜，但它不是最有效的减速剂（普通水分子会吸收一部分中子，而不是将其“反弹”）。因此，铀的放射性同位素比例必须从0.7%左右（天然铀的含量）提高到3%以上，而该过程的成本较高。

作为冷却剂，普通水的缺点是它以液体的形式工作。如果冷却回路发生损坏，那么水会立即沸腾，进而失去冷却效果。因此，如何避免“冷却剂丧失事故”（loss of coolant accident）是这种反应堆设计的首要考虑问题。压水反应堆和沸水反应堆的主要区别是，在沸水反应堆里，作为冷却剂的水是可以沸腾的，其产生的水蒸气直接进入涡轮发电机回路，推动涡轮

转动发电。而在压水反应堆里，通过施加压力使作为冷却剂的水保持液体形式。压水反应堆引入了一个热交换器（蒸汽发生器），将能量传导至次级回路，在这个次级回路中，水可以沸腾进而推动涡轮转动发电。因此，沸水反应堆的设计比压水反应堆简单，但由于在沸水反应堆中，作为冷却剂的水直接进入涡轮发电机，其放射性污染更加严重。大多数俄罗斯设计的核电反应堆——水动力反应堆（WWER）本质上都是压水反应堆。英国只有一台运营中的压水反应堆——西泽韦尔 B（Sizewell B），没有沸水反应堆。

有些核电站使用“重水”作为冷却剂和减速剂，最常见的就是加拿大设计的加拿大重水铀反应堆（Candu）。在重水中，氢的同位素氘替代了最常见的同位素氢。重水是一种更有效的减速剂，因此加拿大重水铀反应堆可以直接使用天然（未浓缩）铀。但是，生产重水的成本较高，这抵消了以重水作为冷却剂所增加的效率。目前，业界正在考虑一种新的加拿大重水铀反应堆设计，这种反应堆将使用轻水作为冷却剂，重水作为减速剂，但是目前仍在筹划阶段。

除西泽韦尔 B 之外，英国所有核电站都用二氧化碳气体作为冷却剂，用石墨作为减速剂。第一代核电站——镁诺克斯核电站使用天然铀，但由于作为冷却剂的二氧化碳遇水会产生弱酸性进而腐蚀管道，因此，大部分第一代核电站都没能按照设计方案长期运营下去。第二代核电站使用了浓缩铀和抗腐蚀材料。与水相比，石墨作为减速剂的效率更高，但却更加昂贵。其主要缺点是暴露在放射线下易燃且易破裂变形。切尔诺贝利使用的石墨慢化沸水反应堆（RBMK）设计也是用石墨作为减速剂，但使用了轻水作为冷却剂。

业界一直对使用氦气做冷却剂、石墨作为减速剂的核反应堆有着强烈的兴趣，这种核反应堆就是所谓的高温气冷反应堆（high temperature gas-cooled reactor, HTGR）。虽然价格昂贵，但由于完全惰性，氦气是一种高效的冷却剂。与使用轻水或二氧化碳作为冷却剂相比，使用氦气和石墨的核反应堆可以在更高温度下运行。这样，核反应堆可以把更多的热量转化成电能，同时，也为核反应堆在发电的同时向某些工业过程提供热量的想法开启了思路。但是，尽管世界上包括英国（从50多年前就开始）在内的几个国家对这种核反应堆开展了研究，但至今仍未开发出商用设计，其试点核电站的业绩也十分不理想。

业内也讨论过第四代核反应堆的设计思路⁹²。美国能源部将改良式第三代核反应堆描述为“进化的（evolutionary）”核反应堆，而第四代反应堆则具有革命性的（revolutionary）进步。业内人士认为，第四代核反应堆“更安全、可持续、经济实惠、更能防止核扩散”。第四代核反应堆设计与现有设计的主要区别是，它能更加充分地使用天然铀。例如，第四代核反应堆的“增殖循环”过程，使得现有反应堆无法利用的天然铀的99.3%能直接使用。与现有反应堆相比，这种反应堆能在更高温度下运行，而且还有其他功能，例如生产氢气。目前，共有六种核反应堆技术被普遍看好，它们是：

- 气冷型快速反应堆
- 铅冷型快速反应堆
- 熔盐反应堆
- 钠冷型快速反应堆
- 超临界水冷反应堆
- 极高温气冷反应堆

上述六种技术中，只有钠冷型快速反应堆和极高温气冷反应堆在核电站运行上得到了较好的发展。然而，这两种技术也都有各自的问题。钠冷型快速反应堆始于上世纪60年代，当时，各国都开始了钠冷型快增殖反应堆的开发项目，但事实证明，这种核反应堆不但价格昂贵，而且稳定性较差。因此，目前只有少有国家继续研究这项技术。同上，很多国家从上世纪60年代开始也开发极高温气冷反应堆，但结果也是无法商业化。因此，现在大多数国家都不再积极开发这项技术了。

这些技术是否能商业化还有待考察，但是其拥护者也承认，2030年之前这些技术都不会成为商业选择。所以，这些技术与选择现有反应堆建设方案无关。

现有的设计方案和供应商

未来十年西方国家最可能订购的设计方案是所谓的改良式第三代核反应堆（Generation III+）。第一代设计方案以20世纪50到60年代的第一批反应堆订单为代表；第二代设计方案以大多数正在运营的反应堆为代表，包括20世纪60年代末到80年代初的订单；第三代则以20世纪80年代初到2000年左右的核反应堆订单为代表。在设计之初，第三代反应堆就吸取了三哩岛事故的经验教训。改良式第三代核反应堆设计于切尔诺贝利核灾难之后，它与第三代核反应堆的主要区别是，改良式第三代核反应堆的“被动”安全性（而不是工程安全性）更高。例如，改良式第三代核反应堆对人为设计的紧急冷却系统依赖较少，而更多的是依赖自然过程，如热对流过程。“9.11”事件引发了进一步改良反应堆设计的考虑，现在，任何新型核反应堆都必须具备抵抗商用飞机撞击的能力。

92 关于第四代核反应堆技术的更详细信息，请见第四代核反应堆国际论坛，<http://www.gen-4.org/>

当前，虽然核反应堆设计方案大量涌现但很多设计方案并没有取得实质性的进步，而且方案本身尚未取得监管部门的认可，订购前景也颇为堪忧。目前，没有明确的标准能将现有各种反应堆设计方法归为第几代，但改良式第三代核反应堆除了是最近15年的设计之外，还有以下主要特点：

- 为加速审批进行了标准化方案设计，并能够降低成本，缩短建造时间；

- 拥有更简单、更粗放的设计方案，方便操作者使用，且更不易发生操作事故；

- 拥有更好的普及性、使用寿命更长（通常是60年）；

- 反应堆核心熔化事故的发生率较低；

- 对环境的影响极小；

- 燃烧率更高，从而降低核燃料消耗，同时减少核废料的产生；

- 使用可燃中子吸收器（“抑制剂”），从而延长核燃料的使用寿命。⁹³

很明显，上述所归纳的特征并不是很精确，不能用以区分改良式第三代核反应堆和之前几代设计（除非某种核反应堆是从已有的反应堆改良而来的）。下面主要介绍目前订购中的或正在审核中的核反应堆设计方案。

压水反应堆（PWR）

目前，全世界共有四家压水反应堆技术的独立供应商：西屋电气公司（Westinghouse）、美国燃烧工程公司（Combustion Engineering）、巴布科克威尔科克斯公司（Babcock & Wilcox, B&W）、俄罗斯供应商俄罗斯原子能公司（Rosatom）。

西屋电气（Westinghouse）

西屋电气的核反应堆技术是目前最为广泛使用的PWR技术，同时也是技术授权最为广泛的核反应堆技术，其中主要被授权公司包括：法国阿海珐公司（原Framatome公司，2001年更名）、西门子子公司（德国）和三菱公司（日本）。西屋电气的核反应堆在全世界范围内销售，2008年西屋电气在中国获得四座核反应堆的订单，然而在此之前的25年中，西屋电气只接到过一份订单（西泽韦尔B）。该公司在美国的最后一份订单（订单没有随后撤销的）要追溯到三十多年前了。1998年，英国核燃料公司收购了西屋电气公司的核能部门，但2006年又将其卖给了日本东芝公司。目前，西屋电气的主要设计为AP1000型核反应堆，但是只获得了中国的四个订单。

AP1000核反应堆（高级被动式）是从AP-600发展而来的。AP-600基本原理是增加反应堆的被动安全性，但其规模经济效益（建造产能更大而不是数量更多的机组）被高估了。一位西屋电气公司的主管表示“规模经济不再可行”⁹⁴，以此来论证应该选择建造6亿瓦而不是10—13亿瓦的核反应堆。1999年，AP-600通过了美国监管流程并获得了运营执照。但直到这时，人们才清楚地认识到，这种

⁹³ <http://www.uic.com.au/nip16.htm>.

⁹⁴ 原子核周刊特别报道，《高级核反应堆的展望》，1989年3月30日，第3页。

设计其实并不经济实惠，因此核电站运营商从未订购过AP-600。之后，西屋电气又将AP-600的产能扩大到11.5亿瓦，希望通过规模经济增强其市场竞争力。2004年9月，核管理委员会为西屋电气的AP1000型核反应堆颁发了最终方案审批合格证书，有效期为5年。2006年，核管理委员会颁发了一个标准的设计认证证书，有效期为15年。然而，西屋电气随后提交的进一步设计方案修订稿最早要到2011年才能通过审核。目前，有很多设计方案都在核设施监察局（NII）的通用设计评估（Generic Design Assessment, GDA）项目下进行审查，AP1000就是其中之一，预计审查工作将在2011年中期完成，但与EPR一样，AP1000能否通过审批，无法保证。

阿海珐（Areva）

法马通公司（Framatome）和西门子公司在从西屋电气独立出来后，于2000年合并了各自的核业务部门。在新的合资公司中，法马通和西门子分别占66%和34%的股份。目前，法马通为阿海珐集团旗下子公司，而阿海珐集团90%以上的股份由法国政府所拥有。2001年，法马通更名为阿海珐核能（Areva NP）。2009年，西门子公司表示有意从合资公司中撤股，但到2009年末，撤股细节仍在商定中。法国所有压水反应堆（共58组）都是由法马通公司提供的，其产品还远销南非、韩国、中国和比利时。德国的11座压水反应堆中，有10座是由西门子公司所提供的，而后者产品还出口至荷兰、瑞士和巴西。

阿海珐核能的欧式压水反应堆（European Pressurised water Reactor.

EPR）是唯一一种具有丰富建造经验的改良式第三代压水反应堆。2005年2月，奥尔基洛托的EPR建设工程获得了芬兰政府颁发的建设执照，2005年夏开始动工。2007年，法国弗拉芒维勒核电站的EPR建设工程开工。中国也订购了两组EPR，但截至2009年末并未进行实际的建设。EPR设计方案分别于2004年9月和2005年2月通过了法国和荷兰监管部门的框架安全审批，但是这种设计很多细节还有待最后敲定，下文会详细讨论。阿海珐与联合能源公司合作，要求美国核管理委员会在核能2010规划下开始对EPR设计方案进行审核和许可。最终的批准结果至少要到2012年才能出台。英国安全监管部门——核设施监察局，正在对2007年GDA项目下的EPR方案进行审核。核设施监察局预计审核工作将于2011年中期结束，但这并不意味着该设计一定能通过审核。对于美国市场来说，EPR是进化动力反应堆（Evolutionary Power Reactor）的缩写。

奥尔基洛托（芬兰）EPR的产能为1600兆瓦，但奥尔基洛托之后的EPR订单产能都提高到了1700兆瓦。这款设计是从法马通公司N4设计方案发展而来的，同时也综合了西门子公司Konvoi设计方案的某些特征。这种新设计方案缩短了燃料重填的时间，从而使其负荷因子⁹⁵高达90%左右。

三菱集团

三菱公司共为日本提供了22组压水反应堆，但它从未试图进入国际市场，直到2010年才将其PWR技术提交给美国核能2010项目进行审核。一家美国电力公司计划建造一座改良式压水反应堆

(Advance PWR, 简称APWR, 压水反应堆的最现代设计)。1980 年左右, 三菱公司与其技术提供商西屋电气公司开始研发改良式压水反应堆, 但这种核反应堆的第一批订单一直迟迟未到。在近10 年内, 业界一直预期敦贺(日本)核电站将在订购一座APWR, 但到2009 年末, 该核电站仍未下建设订单。目前, 核管理委员会正在审核APWR 的一款改良设计方案, 而美国的一家电力公司, TXU, 计划订购这种核反应堆。核设施监察局预计对APWR 的审查不会在2012 年之前完成。

美国燃烧工程公司(Combustion Engineering)

美国燃烧工程公司生产的自主设计的压水反应堆, 在美国已经投产。在国际市场上, 韩国审核通过了这款设计方案。1996 年, 美国燃烧工程公司的核部门被ABB 集团收购, 随后1999 年又被英国核燃料公司接管。现在, 它已并入西屋电气核部门, 于2006 年作为西屋电气核部门的一部分被卖给东芝公司。

1997 年, 美国燃烧工程公司的改良式80 系统(System 80+) 设计方案通过了美国监管部门的审核。西屋电气不打算出售这一设计方案。然而, 韩国供应商斗山(Doosan) 在西屋电气的准许下利用这款设计开发了APR-1400 设计方案。2008 年, 韩国订购了这种APR-1400 核反应堆。2005 年韩国用这一设计方案参加中国的核电站招标, 但是失败了。2009 年12 月, 韩国竞标成功, 获得了阿联酋4 座核反应堆的建设权。现在, 韩国正计划向土耳其出售这款核反应堆。

巴布科克·威尔科克斯公司(Babcock & Wilcox)

巴布科克·威尔(Babcock&Wilcox) 曾为美国供应其自主设计的压水反应堆, 但由于三哩岛事故的影响, B&W 公司的技术也被牵涉, 因此该公司丧失了其在核反应堆销售领域的地位。在美国之外的国际市场上, B&W 公司只为德国供应过一座核电站, 于1986 年完工, 但随后不久就由于安全审批问题于1988 年关闭, 且永不重启。

俄罗斯原子能公司(Rosatom/Atomstroy Export)

俄罗斯核技术的出口是通过俄罗斯原子能公司(Rosatom) 的子公司Atomstroy Export (ASE) 完成的。2009 年, 西门子与俄罗斯原子能公司协商, 成立合资公司出售俄罗斯核技术。俄罗斯的最新的核反应堆设计方案是AES-2006/WWER-1200, 产能1200 兆瓦, 2006 年起出售。俄罗斯的两座核电站, 列宁格勒(Leningrad) 和新沃罗涅日(Novovoronezh) 核电站分别订购了一组AES-2006/WWER-1200 机组。2008 年, 俄罗斯原子能公司在竞标中胜出, 为土耳其核电站提供核反应堆, 不过该公司为唯一竞标者, 而且由于价格较高, 该项目的合约于2009 年被取消。目前芬兰和印度正在考虑使用这种核反应堆设计方案。

沸水反应堆(BWR)

美国通用电气公司(General Electric, GE) 是沸水反应堆的主要设计者, 该公司已向美国和其他国家(如德国、日本、瑞士、西班牙和墨西哥) 供应了大量沸水反应堆。沸水反应堆的技术使用者包括AEG (后被西门子收购)、日立和东芝。虽然

西门子核部门（现已并入阿海珐核能）参加奥尔基洛托核电站竞标时推出了SWR设计方案，但这种核反应堆离商业化生产还有一段距离。

通用 - 日立和东芝

通用电气在日本的技术许可使用方一直在为日本供应沸水反应堆。在日本，共有32座沸水反应堆正在运营或在建。日本一些新型核电站由通用电气公司供应，剩余的则由日立和东芝公司瓜分。目前，在日本，日立、东芝和美国通用电气公司正在联合开发改良式沸水反应堆（Advanced Boiling Water Reactor, ABWR）。1992年，日本订购了首批共两组ABWR，其建造工程分别于1996年和1997年完工。到2009年末，日本共有4组ABWR在运营中、1组在建，另外，台湾也有2组ABWR正在建造中。ABWR在1997年通过了美国监管部门的审批，但这项审批将于2012年过期。目前，通用电气—日立核能联合公司和东芝公司（独立运营）仍在供应ABWR，这两家公司都要向核管理委员会提交设计改良方案，来重新获取安全认证。现在还不清楚，核管理委员会对设计改变的要求，以及重新认证需要多长时间。不可避免的是，与之前的设计相比，新设计必须采用更加昂贵的保护方案，以抵抗大型飞机的空袭。现在ABWR应该归入第三代核反应堆，但如果其新设计获得了核管理委员会的重新认证，那么其改良版就应该归入改良式第三代核反应堆了。NRG电力公司计划在美国核能2010计划框架下建造改良式沸水反应堆。

经济简化型沸水反应堆（Economic & Simplified BWR, ESBWR）由通用电气公司开发，产能为1500兆瓦。2005年10月，通用电气—日立核能联合公司向核管理委员会提出申请，对经济简化型

沸水反应堆进行安全审核。这种经济简化型沸水反应堆是在通用电气公司的简化沸水反应堆（Simplified Boiling Water Reactor, SBWR）和改良式沸水反应堆的基础上发展起来的。20世纪90年代，简化沸水反应堆开始了其安全审核过程，但在审核过程结束前就被撤回了，并且没有获得任何订单。很多美国电力公司都选择了这一设计用于核能2010计划，尽管核管理委员会预计不会在2011年之前完成对经济简化型沸水反应堆的审核工作。经济简化型沸水反应堆参与了英国2007年GDA审核项目，但2008年就被撤回了。在核能2010计划下，共有6家电力公司曾计划建造经济简化型沸水反应堆，但其中一家转向了ABWR，另一家似乎已经放弃了该项目。而且，目前，业界对另外四家的核电站项目的可靠性也保持着怀疑态度。美国之外的其他国家似乎对经济简化型沸水反应堆并不感兴趣，因此，该设计方案可能会被放弃。

其他沸水反应堆

瑞典原子通用公司（Asea Atom）生产其自主设计的沸水反应堆。截止到现在为止，该公司共为瑞典供应了九座沸水反应堆，同时为芬兰供应了两座。Asea Atom与Brown Boveri合并成立了ABB公司，后在1999年被英国核燃料公司收购，之后又于2006年作为西屋电气公司的一部分被东芝公司收购。西屋电气公司在Asea BWR设计方案的基础上开发了BWR-90+，产能1500兆瓦。目前已经立案，但开发工作尚无进展。

加拿大重水铀反应堆（Candu）

加拿大原子能有限公司（AECL）是重水核反应堆的主要供应商，该公司共建造了20多座核反应堆，客户包括加拿大

各个电力公司以及阿根廷、罗马尼亚、韩国和中国的电力公司。加拿大原子能有限公司也曾向印度出售核反应堆，但由于核扩散问题，1975年之后与印度断绝来往，不过印度继续使用那款至今已有四十年历史的核反应堆设计方案建造核电站。阿根廷共建造了三座重水核反应堆，其中一座是加拿大重水铀反应堆，另外两座使用了一种德国设计方案（其中一座至今尚未完工，目前处于停工状态）。

加拿大原子能有限公司未来主要设计方向将是改进式加拿大重水铀反应堆（Advanced Candu Reactor, ACR），预计有750兆瓦（ACR-700）和1100—1200兆瓦（ACR-1000）两种规模。之前的加拿大重水铀反应堆设计用重水作为冷却剂和减速剂，但这种新设计使用轻水作为冷却剂，用重水作为减速剂。目前ACR-700正在接受核管理委员会的审核，由美国电力公司多明尼提供赞助，但2005年1月多明尼撤销资助，而选择了通用电气的经济简化型沸水反应堆设计方案。多明尼公司给出的理由是，美国缺乏加拿大重水铀反应堆技术的实际经验，核管理委员会可能需要至少5年的时间才能完成该技术审批工作。随后，业界似乎又放弃了ACR-700，而选择了ACR-1000。如果电力公司招标选取这种规模的核反应堆，那么具有30年历史的Candu-6设计方案的改良版很可能会参与竞标。ACR-1000参与了安大略省的核电建设招标，但其提出的价格过高。2007年，该设计也参与了英国的GDA项目，但随后不久就被撤回了。现在，有人提议将加拿大重水铀反应堆的国有供应商即加拿大原子能有限公司私有化，因此，加拿大重水铀反应堆的未来订购情况尚未可知。

高温气冷反应堆 (High-temperature gas-cooled reactor, HTGR)

目前尚不确定应将高温气冷反应堆归为第三代核反应堆还是第四代核反应堆。模块式球床燃料反应堆（Pebble Bed Modular Reactor, PBMR）是在西门子和ABB公司为德国开发的设计方案基础上发展起来的，但由于其试点核电站运营状况较差，不久该设计方案就被放弃了。目前，南非正在开发这种核反应堆。经过核反应堆供应商之间的各种收购和合并之后，目前这项技术的认证供应商是阿海珐（前西门子）和西屋电气（前ABB公司）。目前，南非国有电力公司Eskom的子公司PBMR公司正在开发这项技术。该技术的开发资金来自于Eskom公司、英国核燃料公司、美国电力公司爱克斯龙（Exelon）和南非国有企业工业发展公司。上述投资公司将享有为出售该核反应堆而建的新公司的股份。该项目于1998年开始实施，当时预计将在2003年收到第一批商业订单。然而，在完成该项设计的过程中，遇到了比预想严重的问题。2002年爱克斯龙撤资，而其他投资方投入的资金也比合约中规定的要少，这使得Eskom公司不得不承担大部分成本直至2004年，2004年以后南非政府则开始直接投资该研究项目。由于英国核燃料公司转向了西屋电气公司的技术，工业发展公司（Industrial Development Corporation）退出，而且没有新的投资者愿意对其投资，造成该项目的研发时间极大的偏离了原计划，根据2009年的预期，要到2025年以后才能收到第一笔订单。2008年，Jülich Research Centre（德国政府的核能研究机构，是模块式球床燃料技术的最早研发者）发布报告，基于对模块式球床燃料反应堆为原型的核电站的

重新评估，对这一设计方案的安全性提出了质疑。⁹⁶ 2009 年 3 月，南非政府宣布，只为该公司再提供一年的资金。PBMR 公司决定放弃这一正在开发的项目。如今他们可能开发一项去除了部分高级功能的简化设计，其目标是热能利用市场，例如脱盐、煤的气化和液化等。南非政府撤资后，PBMR 公司所进行的项目似乎不可能继续下去。

中国目前正在开发具有相同技术根源的类似技术。业界对中国的技术发展发表乐观评价，但中国政府似乎正转而发展压水反应堆，也许还有沸水反应堆。

附录2
折现、资本成本和预期收益率

核能经济学中一个比较困难的问题是，如何建立一个共同的平台，来比较各核电站使用寿命中不同时段收入流与成本流。按照英国核电站的规划，从订购核反应堆开始到核电站拆撤结束，其时间跨度可以超过 200 年。

在核能经济领域，我们习惯使用现金流折现法 (Discounted Cash Flow, DCF) 来比较不同时段收入流和成本

流。这种方法基于一种直觉上合理的观点，即当前的收益和成本比未来的收益和成本的权重高。例如，如果当前立即清偿债务需要付全款，但如果 10 年后清偿债务，那么就需要多付一部分款项，这些多付的款项构成这些债务在这 10 年内的利息收入。在现金流折现法的分析中，所有的未来预期收益和成本都被“折现”为当前收入和成本。如果一年后将取得 100 美元的收益而“折现率”为 5%，那么这笔收益的“净现值”为 95.23 美元，即现在 95.23 美元的收益一年后能获得 4.77 美元利息而构成一年后的 100 美元收入。折现率一般被视为现金的“机会成本”，换句话说，即这笔钱投资于其他用途所能获得的回报率（假设通货膨胀率为 0）。

如果时间为 10 年左右且折现率较低，上述计算过程似乎比较合理。但如果时间较长且折现率较高，那么折现的影响就相对较大，对核电站的各项预期就需要仔细思考了。例如，如果折现率为 15%，10 年后 100 美元的成本的净现值只有 12.28 美元。即使折现率只有 3%，那么 100 年后的 100 美元成本的净现值也只有 5.20 美元。在常规经济分析中，如果折现率为 15%，那么 15 年后的成本或收益就可忽略不计了（见表 12）。

表 12 折现的影响：净现值

折现期限（年）	3%	15%
5	0.86	0.50
10	0.74	0.25
15	0.64	0.12
20	0.55	0.061
30	0.41	0.015
50	0.23	0.00092
100	0.052	—
150	0.012	—

来源：作者计算

96 R. Moormann, 《对 AVR 球形燃料反应堆的安全性重新评估及其结果对未来 HTR 概念所产生的影响》, Forschungszentrum Jülich, 2008 年, <http://juwel.fz-juelich.de:8080/dspace/handle/2128/3136>

如果我们将这一方法用于分析资本成本较高的竞争性市场中的核电站，那么就意味着在评估一座核电站的价值时，其10年以后的成本和收益就几乎没有影响了。因此，将核电站的使用年限从30年延长至60年，其收益甚微，而15年后核电站的翻修成本也同样几乎没有影响。

按照英国的核电站规划，核电站退役成本花费最多的阶段发生在核电站关闭135年以后，这意味着即便折现率很低（等同于在低风险领域投资的回报率，比如3%），高额的退役成本也不会对当前核电站的建设产生很大影响。如果我们假定拆撤镁诺克斯核电站需要花费18亿美元，而拆撤的最后阶段花费最高，占总费用的65%（11.7亿美元），那么我们只需投入2800万美元，这笔钱到核电站关闭时就可以负担拆撤的最后阶段的费用了。

现金流折现法其实假设了特定的回报率存在于折现的整个时期内。但即使是被视为最安全投资的政府债券最多也只有30年期限。另外，连续100年的经济增长在人类历史上还未出现过。因此，从这个角度来说，该假设似乎并不成立。

因此，在核能问题上，似乎存在着一个明显的悖论，那就是，在投资阶段，我们用15%或更高的折现率（或预期收益率）来计算该投资是否有利可图，而在退役储备基金准备上，我们又用较低的折现率来计算所应预留的退役基金。

解决这个悖论的关键在于风险。由于建造成本难以控制、业绩波动性大、外部事件对核电站正常运营产生影响的风险和很多过程（如高放射性核废料处理和核电站退役）都尚未得到论证，核电站投资一直伴随着较高的风险。在竞争性的市场环境中，核电站刚性的成本结构还会带来

额外风险，即无论最后核电站是否运营，其大多数成本都会实实在在地产生。因此，虽然在电力批发价格较高时，核电站能运营良好（就像英国能源从1996年到1999年所经历的那样），但一旦电力批发价格下降，核电站就会面临严重的经济问题（2000—2002）。核电站在10年内利润状况良好并不能防止其在年景不好时破产倒闭。因此，投资者会将核电站投资视为极具风险的投资，从而要求较高的利率以反映贷款风险，因为贷款可能会轻易损失而无法收回。

附录3 退役

近些年来核电站的退役问题引发了公众的极大关注，原因是一些反应堆的运营期接近结束，预期核电站的退役成本增加，而原定的核电站退役基金的方案变得漏洞百出。

按照惯例，核电站退役可分为三个阶段。第一阶段是移除燃料，关闭反应堆。移除燃料所需时间不等，离线更换燃料型核电站花费的时间相对较少（例如压水反应堆和沸水反应堆）。这些核电站的设计方案包括每年停机几周来更换三分之一的燃料。在线更换燃料型反应堆（如改良型气冷反应堆和加拿大重水铀反应堆）花费的时间则要长的多，因为其更换燃料的机制被设计成在反应堆运行的同时不断更换少量燃料。这就需要运行缓慢的精密机器，而移除整个核燃料可能要花费数年时间。一旦燃料移除，反应堆就不再处于临界状态的危险中，绝大部分的辐射和所有高放射性核废料都已消除。这一阶段完成之前，核电站必须保持和运营期相同的人员配备规模。因此，由于经济效益推动，必须要尽快完成第一阶段的移除燃料工作，但在追求速度的同时必须始终要保持

安全性。从技术角度看，第一阶段很简单，它基本上代表着核电站在运营时所采取的维持运营的操作。需要注意的是，对使用过的燃料的处理不包括在第一阶段的成本里。

在第二阶段，没有放射污染或轻微污染的建筑物将被拆除搬走，只剩下反应堆。同样，相对而言这是常规工作，不需要特别的专业知识。从经济学角度，尽可能延长工期可以使消费者需付的资金最小化——工期越长，从核电站退役基金中所获得的利息便越多。极端情况是将工期拖延到无法再保证建筑物的完整性，建筑物有坍塌危险并导致放射性物质泄漏时。英国计划将第二阶段拖延至核电站关闭后的四十年。

第三阶段是拆除反应堆芯，这一阶段比前两个阶段的花费都要大得多，技术挑战也大得多，需要远程机器人处理反应堆核材料。对于第三阶段，经济利益最大化的情况是在安全的前提下尽量延长工期。在英国，这一阶段预期会延长至135年。

第三阶段结束后，理想状况是土地可以用于任何用途，换句话说，其放射性水平和未受污染土地一样低。实际上，结果并不总是这么理想，在一些受“污染”的核电站，例如运营过一个示范快速反应堆的苏格兰敦雷（Dounreay）核电站，由于土地污染程度很高，土地使用会无限期地受限。

目前只有极少数达到商业规模的核电站运营期完全结束并完成拆撤，所以核电站退役成本并不确定。在拆撤过程中需要的操作据说已在小范围内被证实是成功的，但是除非适用于大规模核电站，否则

这一流程并不能被看做成功的——因为许多流程在某一领域的小范围内有效，但是扩展到商业规模时却是有问题的。

核电站退役成本很大一部分用于销毁核电站产生的放射性废料。现代化设施中的核废料处理费用也尚未明确，特别是在中等放射性核废料和寿命长的低放射性核废料的处理方面，因为在建造处理这些废料的设施方面的经验是匮乏的。

这种不确定性也表现在核电站退役成本被引用的方式上。通常，它被引用为建造成本的一部分（可能为25%）。退役成本显然与建造成本的关系十分有限，因此这也从另一个方面说明公众对核电站退役成本的了解是少之又少。

预期不折现退役成本的典型分配方式是第一阶段占六分之一，第二阶段占三分之一，第三阶段占二分之一。英国能源集团（British Energy）被要求设立“独立”基金来支付其核电站的退役成本，尽管第一阶段原计划用现金流支付。英国核燃料公司（BNFL）是镁诺克斯核电站的原拥有者，后于2005年4月将其转让给核退役管理局。英国核燃料公司是英国国有企业，而财政部政策不允许独立基金适用于国有公司。英国能源公司估算折现率在前80年为3%，之后降为零，而英国核燃料公司估计折现率无限期为2.5%。2003/04年度，英国能源公司将折现率估算提高到3.5%。

如果假设核电站退役总成本为18亿美元，按照上述比例划分到各阶段，第一阶段在核电站关闭后马上实行，关闭40年后完成第二阶段，135年后完成第三阶段，那么未折现成本和折现成本如表13。

表 13 核电站退役成本举例（百万英镑）

	未折现成本	英国能源公司折现率 (3%)	英国能源公司折现率 (3.5%)	英国核燃料公司折现率 (2.5%)
第一阶段	300	300	300	300
第二阶段	600	184	151	223
第三阶段	1200	113	76	41
总计	1800	597	527	574

来源：笔者计算

英国气冷式反应堆核电站的退役成本预计会非常昂贵，因为它们体积巨大，会产生大量废料。压水反应堆（PWR）和沸水反应堆（BWR）相对而言体积小得多，预期成本仅为气冷式反应堆的三分之一。例如，西泽韦尔B 的退役成本预计约为5.4 亿美元。

按照污染者付费（polluter pays）原则的要求，当局采取了多种方式来保证核电站的电力用户为核电站退役买单。无论采用哪种方法，如果实际退役成本比预计的要高，都会造成资金不足，于是不可避免的资金空缺将由未来纳税人填补。在英国，镁诺克斯核电站的期望退役成本在过去的二十年间增加了三倍，尽管最具挑战性的工作一项都没有开始。

筹集资金的方案中最不可靠的是不设退役基金的会计方案，也就是公司不为核电站退役进行会计准备。准备金来自电力用户缴费，不过并不设立与公司其他收入分开的独立基金。公司可以自由地用这些钱进行任何可能获利的投资，准备金以公司资产的一定比例形式存在，并不分配特定的一笔钱或一部分资产专门用来支付核电站拆撤。这种方法是否有效的前提条件是公司在拆撤完成之前会一直存在，并且其资产至少能获得预期的回报率。这种方法的弱点可以从中央电力生产局的私有化过程中看出。中央电力生产局过去是英格兰和威尔士的发电站所有人，1990 年私有化。当时已经从电力用户缴费中收

集约17 亿英镑的会计准备金，然而当公司私有化时，售价仅为其资产价值的三分之一左右，因此实际上三分之二的准备金流失了。政府没有将其销售收入转交给继承核电站的公司，于是剩余的准备金也失去了。

独立基金方案似乎可靠一些。这种方法是，电力用户在核电站运营期内为基金提供资金，准备金被安置于独立管理的基金中，这笔基金，核电站拥有者无权获取。它只能用于非常安全的投资，以将损失风险最小化。这种投资的收益率可能不超过3%。需要拆撤核电站时，核电站拥有者可以取用这笔独立基金。这种方法的风险同样在英国经验中得到体现。英国能源公司在核电站运营期完成之前就已倒闭，当时其独立基金还不够核电站第一阶段拆撤的花费，而第一阶段从未折现角度看是目前为止最昂贵的阶段（占一半左右）。于是政府只好出手挽救英国能源公司，拆撤负担的很大部分将由未来纳税人承担，他们需要在拆撤阶段提供资金。

也许风险最低的准备金方案是核电站开始运营之前就设立好独立基金，这样就有充足的基金可用来支付核电站设计年限结束后的退役。如果假设设计使用年限是30 年，折现率是3%，所需准备的金额是未折现金额的40% 左右。因此，如果未折现退役成本是建造成本的25% 左右，那么基金所需资金约为建造成本的10%。

即使这一方案相对风险较低，但是如果核电站提前退役，或折现成本被低估，又或基金没有实现预期回报率，那么这一方案也将不足以提供预计的退役资金。

总的来看，核电站退役所需资金可能会很高。即使假设在风险最低的情况下，即：能够准确估算核电站的退役成本，折现对总成本的影响有限，也还是没有足够的基金用于支持核电站退役费用。

附录4

美国核电项目现状

南方电力公司 (Southern Company)

沃格特勒 (Vogtle) 项目似乎是“核能2010计划”中最先进的项目。2009年12月，包含两座AP1000反应堆的沃格特勒项目（位于乔治亚州），被视为首个获得美国政府贷款担保的领跑者。讽刺的是，沃格特勒在20世纪80年代完工的两个反应堆是当时核电站成本攀升方面的最糟案例之一。最初预计四台机组总成本为6.6亿美元，实际结果是其中的两台机组就花费了88.7亿美元。

核管会已准许南方电力公司开始在沃格特勒核电站进行有限的建设⁹⁷，例如回填、挡土和做防水等。此外，核管会还给南方电力公司发放了“早期场地许可” (early site permit)，确认厂址的环境适合建造新的核反应堆，而且还批准了紧急计划。佐治亚公共服务委员会批准了佐治亚电力公司的请求，佐治亚电力公司可以从2011年起通过“在建工

程” (construction work in progress) 为其64亿美元的股份回收融资成本⁹⁸。佐治亚公司拥有这个2234兆瓦核电项目45.7%的股权。有了成本回收的保证，南方电力公司宣称即使没能获得贷款担保也会继续建设这一项目。并且，预期成本也降低了，包括45.29亿美元的融资⁹⁹，或是99亿美元的总投资。

南卡罗来纳电力和天然气公司 (South Carolina Electricity & Gas, 简称 SCE&G)

和沃格特勒项目类似，夏日项目（位于南卡罗来纳州）同样具有两座AP1000反应堆，并且都在美国能源部贷款担保入围名单之上。2008年6月，SCE&G估计两座夏日反应堆的建造成本本身（不包括电力传输和信贷成本）将为98亿美元¹⁰⁰。然而，2009年1月SCE&G将它所拥有的55%股权的预期成本从48亿提高到63亿美元，这意味着项目总成本为115亿美元¹⁰¹。SCE&G描述它为总价，可能包含了融资成本。

联合之星 (Unistar)

联合之星 (Unistar) 集团是由美国联合能源公司（巴尔的摩天然气和电力公司）和法国电力公司 (EDF) 于2007年成立的合资企业。EDF随后拥有联合能源现有核资产49.9%的股权。联合之星有三个项目：卡尔弗特悬崖（位于马里兰州），九哩点（位于纽约州），爱尔摩（位于爱达荷州），全部是单一EPR（即欧式压水反应堆，又称渐进型动力堆）。其中最先进的是卡尔弗特悬崖项目，在贷款担保的名

97 绿线 (Green Wire), 《核管会许可佐治亚反应堆进行“有限工作”》，2009年8月27日。

98 普拉茨全球能源报道, 《佐治亚公共服务委员会批准佐治亚电力公司的两座核反应堆和一个生物质能转换厂》，2009年3月19日。

99 原子核周刊, 《佐治亚电力公司降低预期成本》

100 国际核工程, 《能源市场发展: 美国模式》，2008年6月。

101 SNL 能源周报 (加拿大), 《南卡罗来纳电力和天然气公司透露夏日核电站预算扩大》，2009年1月5日。

单上。其他两个项目，九哩点和爱尔摩项目，除非获得贷款担保，否则不会有积极进展。2009年12月，联合之星要求核管会暂停九哩点工程建造和运营复合认证申请¹⁰²。爱尔摩项目的技术不如九哩点项目先进。2009年4月，联合之星主席称，联合能源公司没有公开宣布卡尔弗特悬崖的预期造价，这些数字是保密的¹⁰³。

NRG

南德克萨斯项目包含建造两座ABWR（改良型沸水反应堆），其供应商是东芝，2008年3月东芝采用相同的设计取代了通用电气—日立成为了供应商。这是唯一一个可为ABWR设计提供的项目，尽管一些ESBWR项目可能会转为ABWR。这一项目入围美国能源部贷款担保名单。2009年末它也吸引了大量公共宣传。北美核创新(NINA)——NRG（88%股权）和东芝（12%股权）创建的合资公司——拥有南德克萨斯项目50%的股权。另外50%股权由圣安东尼奥市议会名下的CPS拥有。然而，2009年10月CPS宣布希望将股份减持至20–25%¹⁰⁴，而12月它开始调查完全撤股的可能性。这是因为东芝对扩展项目的预期成本比CPS告知城市官员的130亿美元高出约40亿美元，CPS希望减持或撤股正是发生在此之后。同年12月6日，CPS提出诉讼，要求法庭确认如果它退出这一合约它能拥有的权利。12月23日纠纷升级，NINA提出诉讼，称CPS违反合同，无权拿回它已投入的数亿美元。CPS在几个小时后提出反诉，声称NRG和东芝通过“欺诈、诽谤和违法的行为”引诱CPS加入这一项目，

然后又想甩掉CPS，因此CPS索取320亿美元的赔偿¹⁰⁵。2009年10月，南德克萨斯ABWR反应堆的预期造价约为170亿美元，包括融资成本。目前没有最新的不含融资成本的估算。

德州公用能源 (TXU Energy)

科曼奇峰（德克萨斯州）项目是唯一一个APWR（改良型压水反应堆）项目。它在第一版美国能源部贷款担保候选名单上，但随后被降级为第一替补。目前没有公开的关于这一项目的建造成本估算。

爱克斯龙电力 (Exelon)

2008年11月，爱克斯龙果断地取消了将ESBWR（经济简化型沸水反应堆）用于维多利亚核电站两台机组（位于德克萨斯州）的计划。据报道爱克斯龙正在寻求替代设计¹⁰⁶。2009年6月，虽然早期选址许可流程仍在继续中¹⁰⁷，但爱克斯龙宣布将维多利亚项目向后推迟20年。

多明尼 (Dominion)

北安娜项目是最早宣布选用加拿大ACR-700设计的项目之一，一开始有望投入使用。然而2005年，多明尼宣布放弃ACR-700方案，转而支持ESBWR设计。2009年1月，多明尼宣布在核电站供应方面它和通用电气—日立无法达成一致。多明尼宣称，将“使用具有竞争性的流程”来鉴别建造商能否为北安娜3号提供“能得到许可并在公司可以接受的期限内建造”的反应堆¹⁰⁸。多明尼希望在2010年第一季度结束之前决定供应商。

102 原子核周刊，《联合之星继续暂停九哩点3号》，2009年12月10日。

103 每日记事报（巴尔的摩），《联合能源CEO：法国公司不会对巴尔的摩天然气和电力公司造成影响》，2009年4月28日。

104 原子核周刊，《CPS寻求退出德克萨斯新核反应堆计划，NRG陷入困境》，2009年12月10日。

105 圣安东尼奥快报，《市长号召核反应堆合伙人会谈》，2010年1月5日。

106 原子核周刊，《爱克斯龙放弃ESBWR，为德克萨斯项目寻求其他反应堆设计》，2008年11月27日。

107 绿线，《爱克斯龙德克萨斯核电站计划延期》，2009年7月1日。

安特吉 (Entergy)

2009年2月,出于对成本上升的担忧,安特吉要求核管会推迟对大海湾(位于德克萨斯州)和里弗本德(位于路易斯安那州)的ESBWR反应堆申请的审核¹⁰⁹。安特吉主席兼CEO詹姆斯·伦纳德表示,公司在与通用电气—日立谈判ESBWR工程、采购和建造合同时“遇到瓶颈”,因为合同价格上升到100亿美元,他说这一价格远超出最早的价格预期¹¹⁰。

杜克能源 (Duke Energy)

杜克李 (Duke's Lee) 项目(位于南卡罗来纳州)计划建造两台AP1000机组。2009年9月,杜克能源表示1号机组预计在2021年投入运营,2号机组预计在2023年投入运营,这比最初的计划晚三年¹¹¹。2008年11月杜克能源估计杜克李核电站两台机组的隔夜成本将为110亿美元,是之前预期的两倍¹¹²。

进步能源 (Progress Energy)

哈里斯项目(位于北卡罗来纳州)和里唯项目(位于佛罗里达州)都计划建造两座AP1000反应堆。然而这些机组的建造目前没有什么进展。进步能源暂定的计划是在2019年开始商业运营哈里斯项目中的第一台机组,在2020年开始商业运营第二台机组。然而,由于能源需求的增幅比预期要低,进步能源可能会

选择成为杜克或多明尼项目的合伙人。里唯核电站的时间表也向后推迟了,从2016/17年完工变为2019/20年完工¹¹³。但不管怎样,进步能源已得到授权,可以筹集近2.07亿美元用于里唯1号和2号核电站机组的建造施工及其他相关工作。这部分费用就转嫁给了一般用户,相当于每月额外支出5.86美元¹¹⁴。2009年2月,进步能源估计里唯核电站的建造成本将是140亿美元,不包括30亿美元的传送和连接成本¹¹⁵。

阿莫林 UE(AmerenUE)

阿莫林宣称将撤回位于卡拉维(密苏里州)的EPR项目,原因是“现有法规无法给予我们完成这一工程所需的财政和监管方面的支持”¹¹⁶。

底特律能源 (DTE Energy)

底特律能源项目是建造一座的ESBWR机组,项目位于费尔米(密歇根州)。据报道,其成本将为100亿美元左右,不过这一成本具体包括哪些方面并不清楚¹¹⁷。

宾夕法尼亚电力照明公司 (PPL Corporation)

宾夕法尼亚电力照明公司的贝尔班德(位于宾夕法尼亚州)项目只有一座EPR反应堆,是由PPL和Unistar合资的,PPL是主要合伙人。该项目的网站称,项

108 核子新闻,《多明尼与安特吉销售谈判中止》,2009年2月。

109 原子核周刊,《安特吉修订建造方案,再次寻求收购》,2009年2月26日,第1页。

110 原子核周刊,《ESBWR设计许可规则将于2011年9月完成》,2009年11月12日。

111 原子核周刊,《杜克可能推迟李核电站启动日期》,2009年9月10日。

112 WNN,《杜克提高李核电站成本预期》,2008年11月7日。

113 核管会内部资料,《AP1000潜在买家不确定,核管会设计发现是否会造成延期》,2009年10月26日。

114 核子新闻,《佛罗里达公共事业委员会批准新反应堆成本回收》,2009年11月。

115 核子新闻,《两座AP1000签订EPC合同》,2009年2月。

116 阿莫林,《阿莫林UE在会员大会上要求主办方收回密苏里州清洁能源建议案》,媒体透露,2009年4月23日, <http://ameren.mediaroom.com/index.php?s=43&item=634>

117 Tina Lam,《底特律申请另一座核电站》,底特律自由新闻报,2008年9月19日。

<http://www.freep.com/apps/pbcs.dll/article?AID=20080919/NEWS05/809190398>。

目成本将为130—150 亿美元，包括升级成本、融资成本、初期核燃料成本、应急和储备金费用¹¹⁸。

阿马里洛能源 (Amarillo Power)

阿马里洛项目是建造两座EPR，该项目是由联合之星和阿马里洛能源合资的。截止2009 年底，该项目还没有申请建设和运营复合许可证。

土耳其点项目 (The Turkey Point) 是建造两座AP1000 反应堆。2009 年11 月，佛罗里达公共服务委员会（是佛罗里达州的电力监管机构）批准FPL 从2010 年起可以从用户那里回收两座反应堆的建造成本¹¹⁹。委员会批准FPL 可以收回6.27 亿美元的成本¹²⁰。FPL 当时向佛罗里达公共服务委员会汇报的结果是，土耳其点核电站预计的隔夜建造成本在3108—4510 美元/千瓦之间¹²¹。然而，2009 年9 月，FPL 表示预期成本范围将从121—178 亿美元上涨到150—180 亿美元。因此，原本公布的项目完工日期是在2018 年和2020 年，现在看来很可能会向后推延了¹²²。

田纳西流域管理局 (TVA)

田纳西流域管理局和其他美国电力公司十分不同，因为它由联邦政府100% 拥有。因此，它不像其他公司那样服从于州政府。而且它更易获得资本，无须担心信用等级。所以它不需要联邦信用担保（也不符合条件获得联邦信用担保）。故而，它走在重启核定单的最前线并非巧合。原本计划在贝尔丰特核建造两座AP1000 反应堆，这是“核能2010 计划”最早确定的工程之一，然而TVA 的提议是完成两座20 世纪80 年代中期停工的已部分建好的反应堆，这一提议使贝尔丰特核电站项目蒙上了阴影。2009 年12 月，TVA 发表了一根关于不同核电站扩展方案的环境影响报告，然而其中并不包括在贝尔丰特建造第二座AP1000 反应堆，所以恐怕第二座反应堆实际上已被取消¹²³。如果部分建好的反应堆可以获得建造许可，那么为满足能源需求，完成这些反应堆比起建造一座全新的反应堆要便宜很多。TVA 预计两座AP1000 反应堆的隔夜建造成本将为56—104 亿美元¹²⁴。

118 <http://www.bellbend.com/faqs.htm>

119 核子新闻，《佛罗里达公共服务委员会批准新反应堆成本回收》，2009 年11 月。

120 招商信息，《美国：佛罗里达核电公司收回扩充成本》，2009 年10 月22 日。

121 国际核工程，《能源市场发展》。

122 原子核周刊，《佛罗里达电力照明公司继续反应堆建造计划，但可能改变时间表》。

123 核子新闻，《TVA 宣布发行贝尔丰特环境影响报告书草案》，2009 年12 月。

124 查塔努加时报，《成本估计上升》。



新建核电站的预计成本正以惊人的速度大幅上升，过去十年间，核电站的建筑估算费用已经增长了5倍，而随着核电站的设计更加坚固，估计这一成本还会进一步上涨。而且一些相关问题尚未解决，比如核废料处理、核技术易产生失误等等。

目前，核电站仍然要依靠大规模的公共补贴资助。德国对核电站的补贴数累计已超过1000亿欧元，而这种优惠待遇现在还在继续。结果，为处理核废料和拆除核电站而预留的数十亿资金就成了公司避税的捷径。此外，核电站运营商的赔偿责任上限仅为25亿欧元——相对于一场中等水平的核事故所造成的损失，这个数目只是杯水车薪。

但是，近年来各国政府尝试保留现有核电站的态度却愈发坚决，并且又开始下发新的核能订单，理由是核能是应对气候变化最经济的方案。这显然是一个谬论，原因在于这一论断将相对低廉的核电运营成本与包括建筑费用在内的核电整体成本混为一谈，而后者要高得多。

本研究报告旨在找出决定核电成本的关键经济参数，并对其决定性因素加以评论。报告显示，如果没有电力消费者和纳税人的补贴和保障，新的核电站将无法建成。

 **HEINRICH BÖLL STIFTUNG**
海因里希·伯尔基金会

北京市东城区工体北路新中西街8号亚洲大酒店写字楼309室

电话：+86-10-66154615

传真：+86-10-66154615 转 102

电子邮件：info@boell-china.org 网址：www.boell-china.org

