

Scenario Analysis and Assessment of China's Nuclear Power Technology Pathway before 2030

Zhi LIU, Linwei MA, Jiaying SUN, Zheng LI, Weidou NI

State Key Lab of Power Systems, Dept of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Email: liuzhi09@mails.tsinghua.edu.cn

Abstract: Considering the various options of the arrangement of 2nd generation nuclear power technology and 3rd generation nuclear power technology development, this manuscript analyzed the varieties of possible scenario of China's nuclear power development before 2030, and compared the economy and safety of these scenarios by key indicators such as the probability of reactor core melt accident, the probability of nuclear radiation accidents and cumulative capital investment of new built nuclear power plants. Based on the results, some policy suggestions for China's nuclear power technology pathway before 2030 were finally concluded.

Keywords: nuclear power; safety; economy; scenario analysis

2030年前我国核电发展技术路线的情景分析和评价

刘志, 麻林巍, 孙家兴, 李政, 倪维斗

电力系统与发电设备控制与仿真国家重点实验室, 清华大学热能工程系, 北京, 中国, 100084

摘要: 本文考虑了我国国产二代改进型技术、第三代核电技术的多种发展路线部署的选项, 分析了2030年前我国核电机组发展的多种可能情景, 并分析和比较了不同情景下核电机组的堆芯熔化概率、大规模早期释放概率和累计基本投资。基于研究结果, 对我国2030年前核电发展的技术路线提出了一些初步的建议。

关键词: 核电; 安全性; 经济性; 技术路线; 情景分析

1 引言

截止到2008年底, 我国在役运行的核电(核裂变技术, 以下“核电”均指核裂变发电)机组仅11台, 总装机容量约900万kW, 发电量仅占我国一次能源供应的0.8%^[1], 而世界平均水平为5.5%^[2]。由于核电基本无常规污染物和二氧化碳排放, 大力发展核电对于我国能源的可持续发展具有重要意义。2007年国家发改委发布的《国家核电中长期发展规划(2005-2020年)》中, 提出了2020年核电总装机容量达到4000万kW的目标^[3]。在积极的政策引导下, 截止到2009年底, 我国已经

资助项目: 中广核“中国核电未来发展展望研究”课题

¹国际上三代核电机组是指在二代核电机组已积累的技术储备和运行经验基础上, 针对其不足之处, 进一步采用经过开发验证是可行的新技术, 以显著改善其安全性和经济性。一般指满足URD文件或EUR文件和NUSS建议法规要求的核电站^[9]。国际上部分核电站的代别划分与发展参考文献[10]

²国际上的二代核电机组是指在上个世纪70年代各国投入运行的各类核电机组, 目前世界上商业运行的400多座核电机组绝大部分都属于二代机组。

开工建设的核电机组台数多达20台, 总装机规模超过2000万kW^[4]。近期国内还出现了要进一步提高核电发展目标, 将2020年发展目标提高到7000万kW甚至更高的议论。

但从国际经验看, 世界核电发展并非一番风顺, 始终受到安全性与经济性问题的困扰。而由此产生的疑问是: 我国核电大规模发展能否保证安全性和经济性?

第三代核¹电被国际上公认为是今后一段时期内核电发展的主要技术方向, 其理论上的安全性和经济性指标均优于目前主力在役的第二代核电机组²。而我国也适时引入了第三代核电技术。目前已经规划建设的机组中, 就有6台三代机组, 其中4台为从美国西屋公司引进的AP1000机组, 2台为从法国引进的EPR机组。但由于全球范围内, AP1000与EPR机组目前还尚未实现商业化运行, 其理论上的安全性和经济性仍有待实际工程的验证。而与此同时我国通过多年的引进、消化和吸收实现自主化的国产二代改进型核电技术日臻成熟和

完善。在核电快速发展的背景下，国产二代改进型和引进三代技术的选择问题，一时成为了核电业界的争论焦点^{[4]-[7]}。

在以上问题背景下，本文尝试对 2030 年前我国核电装机容量的二代、三代技术构成的多种情景进行经济性和安全性的综合评价研究。文中首先对 2030 年前我国核电技术发展的可能路线（二代、三代技术选择）进行了探讨，并介绍了核电装机容量的经济性、安全性评价方法。其次，介绍了参考情景以及多种替代情景下核电装机的容量构成以及安全性、经济性的分析和评价结果。最后，总结多情景比较得到一些结论和启示。

2. 2030 年前我国核电技术发展的可能路线以及经济性、安全性评价方法

2.1 四种可能的二代、三代技术发展路线

目前在建或拟建的核电机组大多会在 2015 年之前投运，而 2015 年之后投运的二代¹、三代²机组的容量构成还存在较大的不确定性。本文尽量考虑了各种极端情况，设定了 2015 年后的二代、三代机组发展路线部署的四种情景：

- 1) R0 路线：三代不发展的极端情景，除已规划建设 的 6 台三代机组外，2015 年后全部采用二代技术建设；
- 2) R1 路线：三代较慢发展情景，2025 年后全部采用三代技术；
- 3) R2 路线：三代较快发展情景，2020 年后全部采用三代技术；
- 4) R3 路线：三代核电绝对主导极端情景，2015 年后投产机组全部采用三代技术，二代技术在 2015 年后不发展。

综合考虑现已运行、拟建及在建机组，按上述四种情景进一步设定和推演出的 2006 年至 2030 年核电投产机组的具体部署如图 1 所示，主要分为四个时间阶段：

第一阶段（2007-2015 年）：

假设 2015 年前计划运行的核电机组全部投产³。其中，二代共计 24 台共 2404 万 kW——福建福清 3 台 108 万 kW、秦山二期扩建 2 台 65 万 kW、岭澳二期 2 台 100 万 kW、辽宁红沿河 4 台 108 万 kW、福建宁德 4 台 108

万 kW、浙江方家山 2 台 108 万 kW、海南 2 台 65 万 kW、广东阳江 3 台 108 万 kW、广西 2 台 108 万 kW；三代共计 6 台 840 万 kW——浙江三门 2 台 125 万 kW（AP1000）、山东海阳 2 台 125 万 kW（AP1000）、台山一期 2 台 170 万 kW（EPR）。则投产机组总数达到 30 台，总装机容量 3244 万 kW。

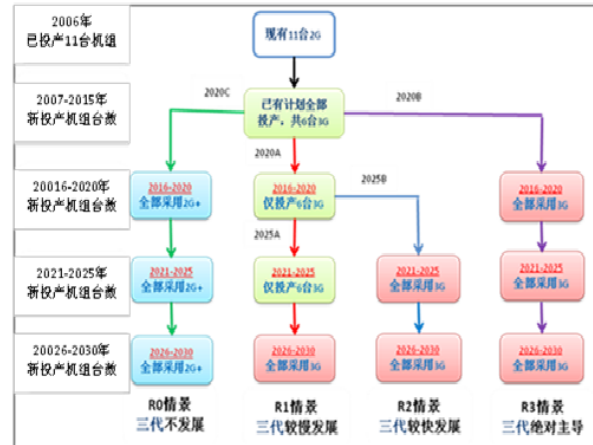


图 1. 我国 2030 年前核电技术发展路线部署的基本设定示意图
(注：2G+即二代机组，3G 即第三代技术机组)

第二阶段（2016-2020 年）：

2016-2020 年投产机组的技术构成分三种情形：

2020A（R1 和 R2 情景）——投产 6 台三代机组⁴，其余全部为二代机组；2020B（R3 情景）——全部由三代机组承担；2020C（R0 情景）——全部由二代机组承担。

第三阶段（2021-2025 年）：

在 2020A 条件下，又分两种情形：2025A（R1 情景）——2021-2025 年投产 6 台三代机组，其余为二代机组；2025B（R2 情景）——2021-2025 年新增装机容量全为三代机组。在 2020B（R3 情景）条件下，2021-2025 全部新增装机容量为三代机组。

第四阶段（2026-2030 年）：

除 2020C 情景（R0 情景）新增容量采用二代机组，其余情形新增装机容量全部为三代机组（R1、R2、R3）。

2.2 核电装机容量的经济性评价方法

对核电经济性的相关研究表明^{[4]-[14]}，核电成本高的主要原因是单位基本投资高，远高于煤电、气电，而运行期间的费用相对较低。国内核电业界对核电经济性的研究与讨论也大多是围绕着机组的单位造价，即单位装机容量的投资费用，进行的。因此，本文选取核电机组的基本投资作为经济性评价的主要指标。在既定的核电

¹这里及下文的“二代机组”是指我国目前在役的核电机组，以及今后采用国产二代改进型技术建设的核电机组。

²这里及下文的“三代机组”是指正在或拟引进的国际三代核电机组，以及今后采用该技术新规划和建设的核电机组。

³核电机组的计划投运时间均来自各大网站。

⁴考虑到技术延续性，将此处设定为 6 台三代机组。

机组容量构成的情景下,可根据二代、三代机组的容量构成和二代、三代机组的单位造价估算出 2030 年我国全部新建核电机组的累计基本投资,作为主要评价依据。

2.3 核电装机容量的安全性评价方法

堆芯损坏频率(CDF)与堆芯损坏概率(CDP)是目前讨论和比较核电安全性的重要指标。但在运行机组台数与运行时间不断增长(多堆多年)的情况下,对堆芯损坏概率(CDP)的计算目前还存在一定争论。按堆年累加来估算多堆多年的事故概率(CDP),其使用条件和范围存在一定局限^{[17]-[18]}。而文中采用的是最近发表^[18]的利用单堆事故频率(CDF)计算多堆年总的事故发生概率 p (CDP) 的公式:

$$p(x \geq 1) = 1 - p(x = 0) = 1 - \frac{(f^{CD} t)^n}{n!} \times e^{-(f^{CD} t)} \quad \text{其中}$$

中 p 为总概率(CDP), x 为事故发生次数(0 为不发生、1 为发生 1 次), f^{CD} 为 CDF 值, t 为核电机组运行时间/堆·年,而实际运算中 n 取 0。

由于上述公式在计算时,涉及了 CDF 并不相同的二代机组和三代机组。因此,计算中利用概率论的独立同分布原理,按如下公式得到全部核电机组累计事故发生概率:

$$P(A+B) = P(A) + P(B) - P(A) \times P(B)$$

其中 $P(A+B)$ 为全部核电机组的累计事故发生概率, $P(A)$ 、 $P(B)$ 分别为二代、三代机组的累计事故发生概率。

而评价核电机组安全性还有另一个指标:大规模早期释放频率(LERF),其计算事故概率(LERP)的方法与上述堆芯损坏概率(CDP)的方法相同。

3 参考情景的分析和评价

3.1 基本设定

1) 2030 年核电总装机规模

考虑近期关于进一步提高核电发展目标的探讨,本文设定参考情景下 2020 年核电总装机容量达到 8000 万 kW, 2030 年进一步达到 2 亿 kW, 而期间基本呈线性增长。

2) 单机容量设定

目前计划投产的二代机组单机容量平均为 100 万 kW 左右,三代机组中 AP1000 为 125 万 kW, EPR 为 170 万 kW。考虑到 2015 年后投产的二代及三代机组(以 AP1000 为参照)的规模很可能进一步提高,因此设定参考情景下 2015 年后投产的二代机组的单机平均容量

为 120 万 kW,三代机组为 140 万 kW。

3) 单机事故频率设定

美国电力研究院(EPRI)2008 年的研究^[16]指出,世界核电的单机 CDF 值已从 1992 年的 9×10^{-5} 次/堆·年降为 2005 年的 2×10^{-5} 次/堆·年。由于缺乏国内二代机组的单机事故频率数据,本文依据 EPRI 的研究,设定参考情景下二代机组(二代)的单机 CDF 为 2×10^{-5} 次/堆·年,而 LERF 值较 CDF 值低一个量级为 2×10^{-6} 次/堆·年^{[5]-[13]}。

在三代机组的设定上,以引进的 AP1000 机组作为参照¹,设定其单机 CDF 值为 5.09×10^{-7} 次/堆·年², LERF 值为 5.90×10^{-8} 次/堆·年。

4) 单位投资设定

目前国内已投运二代机组的单位投资约为 1500\$/kW~2000\$/kW^{[8]-[13]}。近期开工建设的国产二代机组仍属于 M310 的堆型系列,依托自主化效应成本可能进一步降低。因此本文设定二代机组的单位投资为 1500\$/kW 不变。

由于我国引进的三代机组(AP1000)属于首台建造阶段,自主化程度低,比投资很可能偏高。参照目前国内的研究和讨论,初步设定参考情景下三代机组的单位投资为 4000\$/kW 不变。

3.2 装机容量构成

根据上述基本设定,以及第 2 节中所述的核电发展路线部署的四种情景,可推算出 2006-2030 年我国核电装机容量的构成:

R0 路线——机组总计 173 台:其中二代机组共 167 台,累计装机规模 1.92 亿 kW;三代机组共 6 台,累计装机规模 840 万 kW,占总装机规模 4.2%。

R1 路线——机组总计 164 台:其中二代机组共 103 台,累计装机规模 1.15 亿 kW;三代机组共计 61 台,累计装机规模 8500 万 kW,占总装机规模 42.5%。

R2 路线——机组总计 158 台:其中二代 60 台,累计装机规模 6300 万 kW;三代机组共 98 台,累计装机规模 1.37 亿 kW,占总装机规模 68.5%。

R3 路线——机组总计 154 台:其中二代机组 35 台,累计装机规模 3300 万 kW;三代机组共 122 台,累计装机规模 1.67 亿 kW,占总装机规模 83.5%。

3.3 经济性和安全性评价

¹http://www.gov.cn/jdhd/2007-07/24/content_695136.htm (政府门户网站)

²<http://www.snptc.com.cn/Pages/itemdetails.aspx?ListName=核电知识&ListID=28> (国核技网站)

结合 3.1 节对二代及三代机组比投资的设定，可计算出参考情景下的四种发展路线的累积基本投资（表 1）。其中，R0 路线的总投资最低，约为 3000 亿美金，R3 路线则高达 7000 亿美金。

表 1. 参考情景的基本投资数据

	二代加机组		三代机组		总计投资, 亿\$
	比投资, \$/kW	总投资, 亿\$	比投资, \$/kW	总投资, 亿\$	
R0	1500	2602	4000	336	3072
R1	1500	1450	4000	3416	5000
R2	1500	676	4000	5488	6298
R3	1500	172	4000	6832	7024

根据核电机组投运情况，累计统计出不同堆型至 2030 年时所运行的堆·年如下表所示

表 2. 二代、三代机组运行堆年统计（单位：堆·年）

	2015 年		2020 年		2025 年		2030 年	
	二代	三代	二代	三代	二代	三代	二代	三代
R0	147	12	418	42	903	72	1638	102
R1	147	12	397	60	826	138	1341	357
R2	147	12	397	60	697	234	997	613
R3	147	12	322	132	497	441	672	965

结合 3.1 节对单台机组的 CDF 和 LERF 值设定，代入 2.4 节公式，可计算得到的参考情景下四种路线的事故发生总概率（表 4）。其中，事故发生概率最高为 R0 路线，最低为 R3 路线。R3 与 R0 路线相比，CDP 降低了 1.845%， LERP 降低了 0.188%。

表 3. 参考情景的四种路线事故概率估算结果

	CDP	LERP
R0	3.228%	0.328%
R1	2.664%	0.270%
R2	2.005%	0.203%
R3	1.383%	0.140%

比较四种部署路线，发现随着三代机组装机容量构成的提高，事故概率的降低与累计投资的增加基本成正线性相关（图 2），即安全性提高 1 倍（事故概率），基本投资增加 1 倍左右。

4 替代情景的分析和评价

为全面考察未来各种可能的情形，以下将对参考情景中的主要设定参数进行变换，分析四种替代情景下核电经济性和安全性的变化趋势，这四种情景包括：二代机组安全性改善情景、三代机组经济性改善情景、三代机组单机容量提高情景和 2030 年总装机容量降低情景。

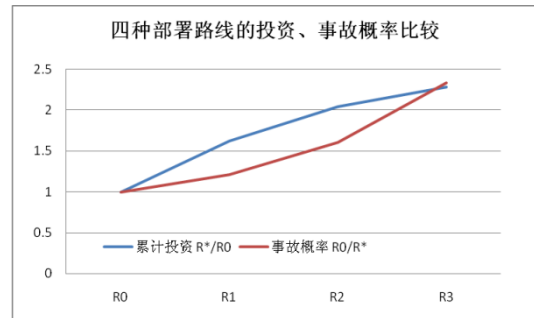


图 2. 四种路线累计投资与事故概率比较结果
注：R*是指 R1、R2、R3

4.1 二代机组安全性改善情景

考虑二代机组的安全性有望通过技术进步得到改善，该情景设定 2020 年后二代机组的事故发生频率达到目前 URD 的要求，即 CDF 从 2×10^{-5} /堆·年降至 1×10^{-5} /堆·年，LERF 从 2×10^{-6} /堆·年降至 1×10^{-6} /堆·年，则核电机组的安全性分析结果如表 4 所示。改善最明显的 R0 路线 CDP 降低了 1.2%，LERP 降低了 0.12%。

表 4. 二代机组安全性改善情景下的事故概率分析结果

	CDP	LERP
R0	2.056%	0.208%
R1	1.757%	0.177%
R2	1.433%	0.145%
R3	1.036%	0.105%

4.2 三代经济性改善情景

引进的新技术由于其自主化程度低，初期建设的核电站成本可能偏高。而批量化建造后，有望通过技术的掌握、设备及建造的自主化等措施降低造价。相关文献 [12][19]-[20] 对核电机组投资的“学习效应”进行了研究分析。而本文利用文献 [20] 推荐的公式计算三代机组的单位造价（\$/kW）学习曲线。其中，初始学习的单位造价分别取 4000\$/kW，学习效率为 0.15，可估算出三代机组的单位造价学习曲线（图 3）。当机组台数达到 100 台以上时，比投资可降至 1500\$/kW 左右。而这里需要指

出的是,近年来发达国家的核电发电成本呈现了上升趋势,其主要原因是建设周期过长。而本文的比投资仅为静态投资,并不能代表今后核电机组动态投资的发展趋势。

考虑到初期建设的三代核电机组高造价中包含技术转让费用,而早期引进二代核电时造价也比目前要高,存在比较基准不一致的问题。因此,在计算学习曲线时又计算了另一种情景。设定三代核电的初始单位造价降为 3000\$/kW,学习效率为 0.15,当机组台数达到 100 台以上时,比投资可降至 1000\$/kW 左右。(图 4)

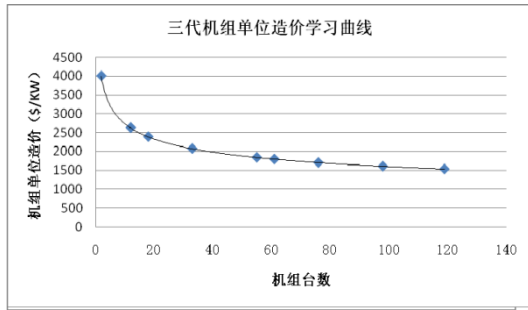


图 3. 三代机组单位造价学习曲线(初始比投资 4000\$/kW, 学习效率 0.15)

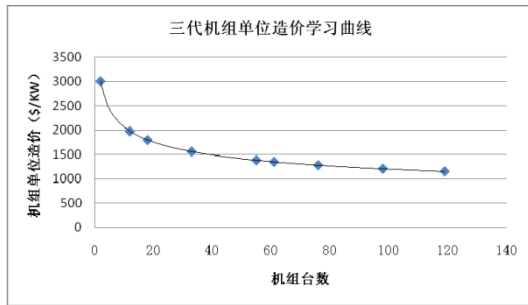


图 4. 三代机组单位造价学习曲线(初始比投资 3000\$/kW, 学习效率 0.15) (这两张图可以合并成一张)

为简化计算三代机组的总投资,本文采用将每个子阶段初始建设与最后建设的比投资取算数平均值作为该阶段的比投资,可计算出四种路线累计投资(表 5)。与参考情景相比,在初始比投资为 3000\$/kW,学习效率 0.15 时,R3 路线的累积投资降低了 4000 亿\$左右,节省的经济成本巨大,而此时四种部署路线的累计投资差别不明显。

表 5. 三代经济性改善情景下的经济性分析结果

	累计投资(亿\$)		参考情景数据
	初始 4000\$/kW	初始 3000\$/kW	
R0	3072	3072	3072
R1	3669	3148	5000
R2	3806	3057	6298

R3	3956	3057	7024
----	------	------	------

4.3 三代机组单机规模扩大情景

文献^[9]指出:轻水反应堆的比投资随着单机容量(千瓦数)的加大而减少(在单机容量为 150 万-170 万千瓦前均如此),因此先进的第三代反应堆的单机容量都在扩大。

由于国际上三代机组尚处建设阶段,可参考的建成比投资数据少,故本文未作投资计算,而仅从发展路线的三代机组台数及事故发生概率角度来考虑。

将 2015 年后投运的三代机组单机容量设定由参考情景的 140 万 kW 扩大到 160 万 kW,则可计算出变化后所需三代机组台数(表 6)及事故发生概率(表 7)。以 R3 路线为例,三代机组台数从 122 台降低到 105 台;机组台数的减少会导致按堆年计算的事故概率的降低,但比较发现,事故发生概率降低并不明显,CDP 只降低 0.005%,LERP 降低 0.001%。

表 6. 三代单机容量扩大机组台数和容量计算结果.

	二代		三代	
	台数	总容量,万 kW	台数	总容量,万 kW
R0	167	19157	6	840
R1	101	11237	55	8680
R2	59	6197	87	13800
R3	35	3317	105	16680

表 7. 三代单机容量扩大下的事故概率计算结果.

	CDP	LERP
R0	3.228%	0.328%
R1	2.622%	0.266%
R2	1.978%	0.200%
R3	1.378%	0.139%

4.4 2030 年核电装机规模降低情景

由于未来我国核电发展规模存在不确定性,尤其是当电力需求低于预期或可再生能源发电的发展超过预期时,2030 年需要的核电发展规模有可能低于 2 亿 kW。同时,我国核电的快速发展也仍面临选址、公众接收性、核废料处置、装备制造能力、人才和管理体制等方面的制约。所以本文设定了核电整体发展规模降低的情景,设定 2030 年核电发展规模为 1.4 亿 kW。在其他参数不变情况下,可计算机组构成机组台数、累计投资(表 8)及事故发生概率(表 9)。

5. 结论和启示

本文主要针对 2030 年前新建核电机组的装机规

模、二代和三代的技术选择进行了多种情景分析和经济性、安全性的初步分析和评价。通过参考情景和四种替代情景分析结果的比较（图 5 和图 6），可以得出以下启示：

表 8. 1.4 亿 kW 情景下的机组容量构成¹和基本投资

		R0	R1	R2	R3
二代加	台数	117	78	60	35
	容量：万 kW	13157	8477	6317	3317
	比投资，\$/kW	1500	1500	1500	1500
	总投资，亿\$	1836	1134	810	360
三代	台数	6	40	55	76
	容量：万 kW	840	5600	7700	10640
	比投资，\$/kW	4000	4000	4000	4000
	总投资，亿\$	336	2240	3080	4256
累计投资亿\$		2172	3374	3890	4616

表 9. 1.4 亿 kW 情景下的核电事故概率计算结果

	CDP	LERP
R0	2.694%	0.273%
R1	2.271%	0.230%
R2	1.995%	0.202%
R3	1.370%	0.138%

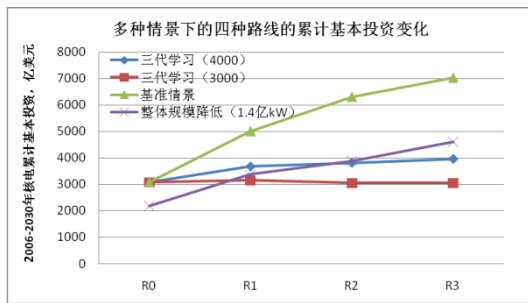


图 5. 多种情景下 2006-2030 年核电建设的累计投资比较.

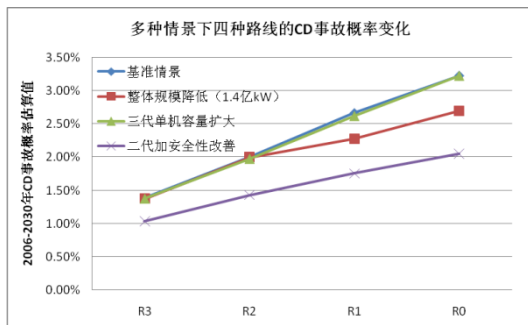


图 6. 多种情景下 2006-2030 年核电机组 CDP 比较.

1 由于已有机组容量未取整数，新建机组取为整数，所以在累加时会出现一些偏差。

1) 二代机组的事故频率的降低将给整个核电容量的事故概率带来明显改善（图 6），CDF 和 LERF 提高一倍后，完全不发展三代技术的极端情景在事故的发生概率与参考情景中的 2020 后全部采用三代事故的发生概率近似；

2) 三代机组急需改善经济性，在推广过程中实现成本的“学习”效应，否则，以三代技术为主的核电容量发展部署将带来沉重的经济负担。而经过学习后的三代机组在将有很强的竞争力（图 5）。

3) 单机容量扩大有利于降低核电机组台数，但事故发生概率的降低并不明显（图 6），对于经济性改善的意义更大^[9]。

4) 核电总体发展规模的降低可明显改善整个核电的经济性，相应的事故发生概率也有一定降低。但这一情景取决于政策、电力需求等因素的制约。

References (参考文献)

- [1] National Bureau of Statistics. Statistical Yearbook of China 2009. Beijing: China Statistical Publishing House, 2009.9
中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2009. 北京: 中国统计出版社, 2009.9
- [2] BP. BP Statistical Review of World Energy June 2009. 2010 年. 网址: <http://bp.com/statisticalreview>
- [3] National Development and Reform Commission. Medium and long-term Development Program for Nuclear Power(2005-2020). Beijing, NDRC, 2007
国家发展和改革委员会. 核电中长期发展规划 (2005—2020). 北京, 国家发改委, 2007
- [4] Xiao Xinjian, Gao Shixian, Han Wenke. Advantages, Challenges and Recommendations for a Leap Development in National Nuclear Power Industry. Energy of China. 2009.3
肖新建, 高世宪, 韩文科. 我国核电实现跨越式发展的优势、挑战与建议[J]. 中国能源. 2009.3
- [5] Lu Feng. Labyrinth of China's Nuclear Power: the Marginalization of Domestic Intellectual Property. Business Weekly, 2009
路风. 中国核电谜局: 自有知识产权被边缘化. 商务周刊, 2009.1
- [6] Wen Hongjun. The Third Generation Nuclear Power Becomes Expensive. Business Weekly Oct, 2008
温鸿钧. 第三代核电变贵了[J]. 商务周刊. 2008, (10), P70-73
- [7] The Comprehensive Evaluation on Safety Situation of Evolutional generation Nuclear Power Plant. Nuclear Safety. 2007
第二代改进型核电站安全水平的综合评估, 核安全. 2007.4, P1-26
- [8] Liu jianghua, Ding xiaoming. Study on Issues Related to the Economic Analysis of Nuclear Power. Economy of Electrical Technology 2008
刘江华, 丁晓明. 核电经济性分析有关问题探讨[J]. 电力技术经济. 2008. (2): P47-51
- [9] Ou yangyu. The trend of world nuclear power and the orientation of the 3rd-generation nuclear power technology. Power Equipment. 2007
欧阳予. 世界核电发展趋势及第三代核电技术的定位[J]. 发电

- 设备.2007.(4):P325-331
- [10] Wang xiuqing. A Report of the Latest Development of Chinese Nuclear Power Bei Jing: Science Publishing House Feb,2008
王秀清.中国核电发展前沿报告.北京, 科学出版社, 2008,2
- [11] Wen hongjun. A Research on the Comparison between external costs of nuclear power and coal-fired power and the corresponding measures. Nuclear Science and Engineering 2005
温鸿钧.核电与煤电的外部成本比较及对策研究[J].核科学与工程.2005.(6).P97~105
- [12] Liu hong,Tang bo,Xiao qiong. Economic Analysis and Risk Control of Nuclear-Power Technology Based on the Project Investment. China Electric Power 2008
刘宏,汤博,肖琼等. 基于工程投资的核电技术经济分析及风险控制[J].中国电力.2008,5: P9~13
- [13] Zou shuliang. Economic Analysis of China Nuclear Power. Journal of Nanhua University
邹树梁.中国核电经济性分析[J].南华大学学报.2009.2;P1~3
- [14] The Economic Feature of Nuclear Power. Foreign Nuclear News 2009
核电的经济性.国外核新闻.2009.5:P28~32
- [15] NRC. SECY-01-0009 Modified Reactor Safety Goal Policy Statement 2001
- [16] EPIR.Safety and OperationalBenefits of Risk-Informed Initiatives.2008
- [17] Liu changxin, Zhang zuoyi, Qian yongbai. Discussion of the Probability of the Reactor Core's Damage in the Condition of Multiple Reactor Years. Atomic Science and Technology.
刘长欣, 张作义, 钱永柏. 关于多堆年情况下堆芯损坏概率的讨论. 原子能科学技术, v42, n4, 2008 年 4 月:P289~291
- [18] Zhao ruichang.Tong jiejuan,Zhoulinjun, Further Discussion on Appropriate Interpretation of the Probability of the Core's Damage. Atomic Science and Technology.
赵瑞昌, 童节娟, 周林军等.关于正确理解堆芯损坏概率的进一步讨论[J].原子能科学技术,2009,43(12) :P1057-1061
- [19] Kang yexi.Xiao dingsheng,Si guojian, Learning Effect and Standardization Effect in NPP's Construction. China Nuclear Power. 2009,2(3):244-248
康椰熙,肖定生,司国建.,核电建设的学习效应和标准化效应[J].中国核电.2009,2(3):P244-248
- [20] McDonald A, SCHRATTENHOLZER Leo. Learning rates for energytechnologies[J] . EnergyPolicy, 2001,29 (4) :P255~261.