

工程科技论坛
(第二场)

**“中国可持续发展核电战略研讨”
报告会论文集**

中国工程院
二〇〇〇年四月二十五日



目 录

中国核电的可持续发展	赵仁恺 (1)
我国下一代核电厂安全目标的初步设想	赵成昆 (10)
加快实施核电国产化战略, 抓紧发展我国核电	周小谦 (23)
我国核电的可持续发展必须走国产	康日新 (40)
高起点起步, 深层次创新	濮继龙 (48)
核电的经济性	吴宗鑫 (60)
试验研究与设计结合是核电 可持续发展的必要保证	杨 歧 (86)
设计自主化是核电可持续发展的关键因素	杨传德 (92)
我国核电自主开发的基本经验 与可持续发展战略	蔡剑平 (108)
秦山二期建设与核电可持续发展	叶奇蓁 (117)
我国天然铀生产状况及其持续发展的对策	李开文 (127)
核再循环: 确保核电可持续发展的 关键因素之一	蒋云清 (137)
我国煤电链和核电链对健康、环境 和气候影响的比较	潘自强 (145)
我国核电的经济性现状与前景	施向军 (164)
中国核电燃料元件的发展	陈玉山 (217)

中国核电的可持续发展

中国核工业集团公司科技委 赵仁恺

一、为了人类的健康和保护环境，未来的能源应是“可持续发展的和无害于环的”这已为当今国际所共识。

这是由于：

(1)全球能源资源储量有限，据1998年世界能源委员会发表数字（见表一）

表一。1998年全球能源资源和储量 单位：Ej(G toe)

	世界能源委员会		国际应用系统分析研究所			1998年 消费量
	探明储量	最终可采 储量	储量	资源	总资源量	
常规石油	6300 (150)	8400 (200)	6300 (150)	6090 (145)	12390 (295)	142.8 (3.4)
常规天然气	5586 (133)	9240 (220)	5922 (141)	11718 (297)	17640 (420)	84 (2.0)
煤炭	18060 (430)	142800 (3400)	25452 (606)	117348 (2794)	142800 (3400)	100.8 (2.4)
天然铀	3.4 Mt	17 Mt				64000 t

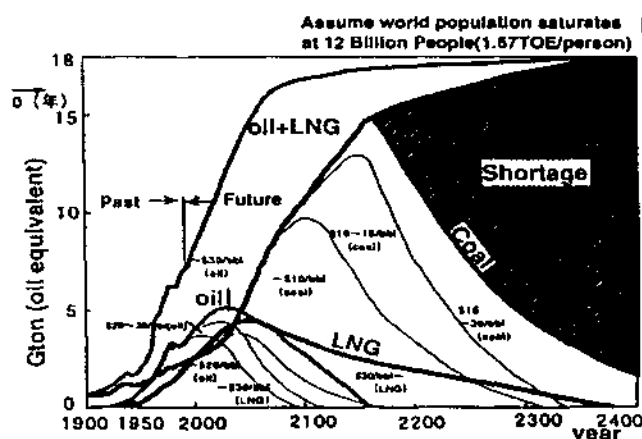
注：储量是已经查明的在现有技术条件下经济可开采的埋藏量；资源是地质探明程度较低和/或在现有技术条件小经济可行较差的埋藏量；总资源量是两者之和。

来源：WEC, 1998; IIASA, 1998。

由表中可见，按 1998 年消费量，全球能源资源已探明储量：
石油仅供人类约 50 年所需；天然气仅供人类约 70 年所需；煤炭仅
供人类约 2000 年所需；天然铀仅供人类约 60 年所需。

按现在估计，未来二三百年内全球能源资源将被消耗殆尽。（见右图一）

(2) 化石燃料燃烧排放的二氧化碳造成的温室效应将严重影响人类生存环境，据国际能源机构 1995 年公布的世界二氧化碳排放量（见表二）



（表二） 国际能源机构公布世界二氧化碳排放量排行榜 1995

	二氧化碳排放量 (百万吨)	人口 (百万)	人均排放量 (吨/人)	百分比 (%)
美国	5228.52	263.06	19.88	23.7
中国	3006.77	1200.24	2.51	13.8
俄罗斯	1547.89	148.20	10.44	7.0
日本	1150.94	125.57	9.17	5.2
全球	22000.00			

由表中可见我国二氧化碳排放量已占世界第二位，但人均甚低，仅为美国的八分之一。

美国公共利益研究集团，今年四月六日发表的一份研究报告说，过去十年地球变暖导致的异常气候和天气灾害在全球夺走了 33 万多人的生命，造成的经济损失高达 6252 亿美元。

报告说，地球变暖可能是人类面临的最严重的环境威胁。研究表明，90 年代是过去 1000 年来最热的十年。过去十年中全球发生的重大灾害比 50 年代多 4 倍，造成的实际经济损失也多 9 倍。

二、核能和可再生能源是今后能源发展的方向。

化石能源是不可再生能源，其资源将在今后数百年内消耗殆尽。

可再生能源是可持续发展的重要能源，但受到一定条件限制，尚不能充分发挥其作用。

核能是可持续发展的能源，也只有核能是可以大规模取代化石能的能源，是“取之不尽用之不竭”的能源。

三、当前，对一些发达国家，如英美等正将处于一个决策关头。已建成的核电站不久将到寿期，到期后：是由化石料取代核能呢？还是再建新一代核电站？如果再建新一代核电站，是继续走一次通过的道路呢？还是应考虑铀钍循环？

四、热堆采用核燃料一次通过的技术路线，则世界已探明的铀资源仅供人类数十年所需。如果裂变堆采用铀钍循环的技

术路线，发展快中子增殖堆，则全世界铀资源将可供人类数千年所需。

聚变反应堆核电站发展成熟商用后，资源丰富，将为人
类“永远”解决所需能源。

五、我国核电发展的战略路线，是早已明确并正在执行的。
即：

- 近期发展热中子反应堆核电站；
- 为了充分利用铀资源，中期发展快中子反应堆站；
- 远期发展聚变堆核电站，从而基本上永远解决人类能源的需求的矛盾。

六、热中子反应堆、快中子反应堆和聚变堆科学技术发展现状。

热中子反应堆（压水堆、沸水堆等）已经成熟并大规模应用。

快中子反应堆已可商业应用，但经济性和增殖性能有待进一步提高。

聚变堆的开发正处在工程应用基础研究阶段。

七、在采用铀钍循环的技术路线前提下，热中子堆核电站和快中子堆核电站的有效发展作用期（即作为主角期）分析：

热中子堆核电站，在核电发展中的有效发展作期，主要取决于铀资源的供应和快中子堆核电站成熟并投入商业运行的时间。

快中子堆核电站在核电发展中的有效发展作用期，主要取决于它本身和聚变堆核电站成熟并投入商业运行的时间。

聚变堆在 20 世纪已研究了 50 年，一般乐观的估计，其成熟期在 2050 年之前；中等的估计是在 2050 年以后；保守一些的估计是 2100 年。

八、据此试以我国核电发展情况作粗略估算： 设

(1) 在满足一定的装机容量条件下取尽可能少的天然铀需求量为准则。

(2) PWR-1000 年产钷量约为 150kg。氧化物燃料快堆 FBR-1000 初装料约为 3700kg 钷。则每 25 PWR-1000 堆年所生产的钷可供一座 FBR-1000 的初装料。

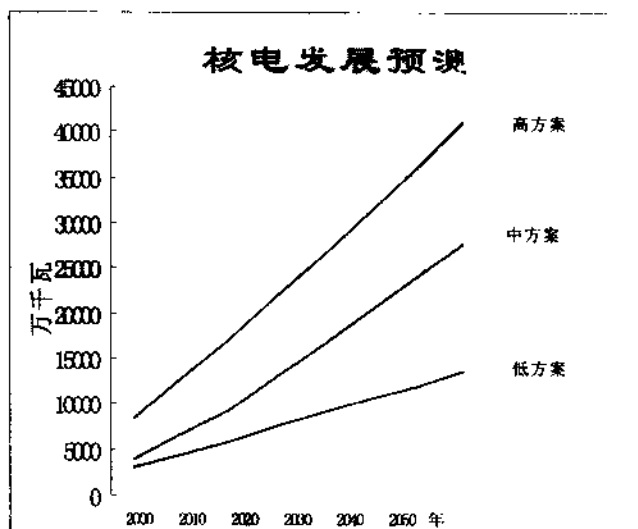
(3) 快堆的线性系统倍增时间取为 15 年（氧化物燃料快堆为 15~20 年，碳化物燃料快堆为 10~15 年，金属燃料快堆为 10 年以内）。

(4) 快堆的投入时间取 2025 年。

(5) 我国到 2050 年核电装机容量取 1.2 亿千瓦（低方案）。

我国到 2050 年核电装机容量，根据不同部门的估计，可以分为高中低三种方案：高方案为 3.6 亿千瓦；中方案为 2.4 亿千瓦；低方案为 1.2 亿千瓦。

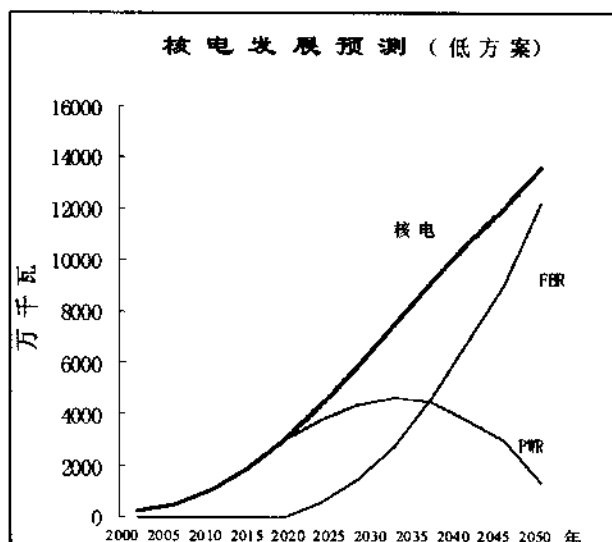
根据上述假设，在此取低方案 1.2 亿千瓦，分析我国到 2050 年左右，核电装机容量为 1.2 亿千瓦时，我国压水堆核电站和快中子增殖堆核电站发展状况（图三）



九、如图所示，初步分析意见：

(1) 热中子反应堆的有效发展作用期。

目前压水堆核电站的设计寿命为 60 年



(URD 要求)，我们现在动手建设的百万级压水堆核电站将在 2010 年左右投入运行，其退役期约在 2070 年。我们在 2030 年建成的压水堆核电站的退役期即已达 2100 年。

再考虑到铀资源的经济性和快中子堆核电站的可投入期。

压水堆核电站即热中子堆核电站的大规模发展期约为 2010 年~2040 年之间。

此后已建的压水堆核电站可继续运行直至寿期终了。

不确定性:

①此发展期随快堆投入时间提前而缩短,随快堆投入时间推迟而扩大。

②此发展期随我国 2050 年前核电规模的增减而扩大或缩短。

(2) 快中子增殖反应堆核电站的有效发展作用期。

我国为核资源所限,必须发展快中子增殖堆以充分利用铀资源。估计快堆投入时间约为 2025 年左右。从 2025 年到 2040 年左右与压水堆同时发展。2040 年以后即以发展快堆为主,直到聚变堆成熟,发展聚变堆为止。

因此:

- 热中子压水堆的有效发展利用期(大规模发展期)约为在 2010~2040 年这 30~40 年期间,2040 年以后即进入平衡期或衰减期。
- 快中子增殖堆的有效发展利用期(大规模发展期)约为 2025 年直到聚变堆成熟。此后即进入平衡期或衰减期。
- 聚变堆核电站,将是可以从基本上“永远”解决人类能源的需求的矛盾。

十、国际上核电发展的经验,某些方面当前值得我国借鉴。

选定一种堆型，如压水堆，使之系列化、标准化，批量生产。科研、设计、制造、施工、运行、管理都能在同一种堆型中得到充分的积累经验和提高，建设周期和成本可以降至最低，能多快好省的发展核电。更重要的是同一种堆型核电站所积累的经验及运行堆年的考验可以使它的可靠性和安全性得到极大的提高。

如法国早期发展核电走的是英国路线，发展了气冷堆 G1、G2 等系列，后来由于要发展潜艇核动力，以及认为 PWR 核电站性能更好，在六十年代毅然改型，选用 PWR，而且单一品种，只用 PWR。30 万 kw 一个标准环路，逐步系列化、标准化，逐步发展提高其安全性、经济性，发展到现在，既解决了法国电力的需要，又在核电技术上有了重大发展，成了可与西屋公司相抗衡的、国际上有地位的一支科技力量。

法国为了充分利用铀资源，走了铀钚循环的技术路线，发展了快中子堆，道路是正确的，快堆的发展在国际上是领先的，目前只是由于环保及防核扩散以及快堆发电经济上还有些问题而发展受阻。

十一、目前，一般规律，发展一种新堆型核电站，从开始研制，直到成熟可靠，能商业推广使用，约需 20~30 年，因此如果现在即开始发展另一种热堆新型核电站，则需到 2020~2030 年才能投入商业应用发展，则距 2040 年有效发展利用期太近，除特殊用途外，宜郑重考虑。

十二、结 论:

- (1) 我国应以现有压水堆核电站为基础, 实现国产化, 逐步发展提高, 批量化生产建设, 缩短建造周期, 降低成本, 多快好省发展核电, 以适应我国电力发展的需要。
- (2) 视快堆和聚变堆的发展, 快中子增殖堆在我国核电建设中占有十分重要的地位, 应大力支持促进。快中子增殖堆和聚变堆越早投入使用, 与人类和我国能源越有利。
- (3) 尽快开始乏燃料后处理厂及其配套设施的建设。应在 2010 年左右逐步形成成套铀钚循环规模生产能力, 以适应我国核能发展的需要。

我国下一代核电厂安全目标的初步设想

国家环保总局 赵成昆

一、引言

截止到 1999 年，世界上共有 436 座不同类型的核电机组在运行，累计已超过 9400 个运行堆年，年发电量约占世界发电总量的 16%。世界核电发展约五十年和我国核电发展约二十年的实践表明，核电是一种安全、清洁、经济和可靠的能源。在长期的核电安全实践中建立并逐步完善的现有核安全法规对于保证核电厂的设计、建造和运行的安全是行之有效的。但美国三哩岛和前苏联切尔诺贝利核电厂的事故表明，核电厂发生严重事故的概率虽然很低（现有核电厂发生严重堆芯损坏的频率约 10^{-4} 次事件/堆年），也不能忽视其存在的风险。经验表明，一个较大的核事故会对公众和潜在的核电用户产生相当大的负面影响。基于上述认识，国际核电界和核安全界已达成共识并正在付出极大的努力，以提高下一代核电厂的安全水平，促进核电的发展，更好地为人类文明服务。这种努力涉及核电厂的设计、建造和运行等诸多方面，既包括提高核安全目标和核电从业人员的核安全文化水平，也包括核电厂系统和设备的改进，其成果比较集中地体现在美国、欧洲等国的核电用户要求文件（URD 和 EUR 等）和与之相适应的一批先进型核电厂的设计方案中。有关国家的核安全管理当局对这些设计给予了积极的评价，并批准了其中的一些设计。虽然上述核电用户要求

文件主要是由核工业部门编制的，但它体现了对下一代核电厂在安全性、先进性、经济性和可靠性等方面普遍提高和协调发展，以更好地满足核电用户要求，增加社会对核电的可接受性的要求。当然，要使核电得到健康发展，必须首先确保安全。最近国际原子能机构将核安全纳入机构的核技术应用、核安全和核保障“三大支柱”中，并受到成员国的广泛支持。这一政策充分说明国际社会在促进核能发展的同时，更加重视核安全。这里所指的核安全不仅仅是安全标准，还包括与核安全有关的一切活动。

我国核电起步较晚，目前有秦山、大亚湾两座核电厂三台机组在运行，四座核电厂八台机组在建造。1999 年我国在役核电厂的运行状况基本良好，全年未发生核泄漏和放射性污染事故。秦山核电厂是我国自行设计和建设的第一座原型堆核电厂，为我国的核电设计、建造和运行积累了不少宝贵的经验，为核电国产化作出了积极的贡献。目前该电厂正在按照国家核安全局的要求实施全面的“定期安全审查”，制定整改方案，提高核电厂的整体安全和运行水平。大亚湾核电厂两台 90 万千瓦机组 1999 年共发电 134.63 亿千瓦·小时，全年基本处于高功率稳定运行，并首次创造了两台机组同时在一个燃料循环周期内不停机不停堆的记录。为进一步提高安全水平和运行水平，大亚湾核电厂已制订出中长期改进计划，分阶段实施。四座在建核电厂的建造质量总的来说处于较好的受控状态，但由于各种原因，特别是管理方面的原因，在不同程度上

存在一些质量问题。极个别制造厂在重大设备制造过程中没有认真执行核安全法规及质量保证大纲和程序，导致较严重的设备质量问题。对于上述情况，国家核安全局在要求业主加强管理的同时，将进一步采取措施加强监督工作，并依法对违反有关核安全法规的单位作出严肃处理，确保核电厂的建造质量。

虽然我国核电建设与世界核电发达国家相比规模还不小，但近年来的发展态势已引起世人关注。这体现在（1）我国今后的核电规划、技术路线和国产化方针与能力，（2）在我国目前多种堆型、多种标准、多国进口的建设局面下，如何采取强有力的措施加强核安全管理和监督，确保核电厂的高质量建设和今后的安全运行，（3）我国对下一代核电厂的安全水平要求。我认为要实施我国核电的可持续发展战略，深入研究和探讨上述问题及其他相关问题是十分重要的。今天我发言的重点是我国下一代核电厂安全目标的一些初步设想，它仅仅涉及下一代核电厂设计中的几个重要问题，特别是安全目标和严重事故的预防和缓解。

二、下一代核电厂设计中的几个重要安全问题

经初步研究，我们认为对我国下一代核电厂选型和设计可能产生较大影响的有下述主要问题：

安全目标

核安全的总目标是：通过在核电厂建立和保持对辐射危害的有效防御，保护人员、社会和环境。

核安全的总目标是由两个具体的安全目标所支持的，这两个具体的安全目标是：

辐射防护目标：保证所有运行状态下核电厂内的辐射照射或者核电厂放射性物质的计划排放保持在规定限值之内和合理可行尽量低（ALARA），保证减轻所有事故的放射性后果。

技术安全目标：采取所有合理可行的措施预防核电厂的事故和减轻它们的后果；保证在核电厂设计中所考虑的所有可能的事故，包括概率很低的事实的放射性后果很小并在规定限值之内；保证有严重放射性后果的事故的可能性极低。

在核电厂的设计中，应该完成完整的核安全分析，以评估核电厂工作人员和公众所接受的辐射剂量及可能的环境后果。安全分析应该包括（1）所有计划的正常运行模式；（2）在预计运行事件下的核电厂性能；（3）设计基准事故；（4）可能导致严重事故的事件序列。通过分析，可以确立设计对假设始发事件和事故的足够承受能力，可以验证安全系统和安全相关物项或系统的有效性，可以制定应急响应要求。

尽管已经采取了控制辐射照射和减小事故可能性的措施，发生事故的可能性仍然存在，因而仍然要求采取减轻放射性后果的措施。这样的措施包括工程安全措施、运行组织所建立的现场事故管理程序和由管理当局所建立的可能的厂外干预措施。核电厂的安全设计应该遵循导致高辐照剂量或放射性物质释放的事件有很低的概率（可能性）以及有较高概率（可能性）的事件没有或有很小的辐射后果的原理。

作为检验所确定的安全目标，特别是技术安全目标是否被满足的一个指标，可采用下述定量的概率安全目标：

- 发生严重堆芯损坏的频率每运行堆年低于 10^{-5} 次事件；
- 需要厂外早期响应的大量放射性释放到厂外的频率每运行堆年低于 10^{-6} 次事件。

应当注意的是上述概率安全目标既不能代替核安全法规的要求，也不能作为颁发许可证的唯一基础，它仅仅是核实和评估设计安全水平的一个导向值和许可证过程的一个参考。

严重事故：虽然已提供了高可靠的设计来对付设计基准事故以防止反应堆堆芯的严重损坏和抑制放射性物质的释放，但是应该意识到某些低概率的事件序列仍然有导致严重堆芯损坏的可能性。应该使用工程判断和概率方法的结合对这些严重事故序列给予考虑，确定对这些序列合理实际的预防和缓解措施。可接受的措施不需要使用用于评价设计基准事故的保守的工程实践，而可以采用现实的和最佳估算的假设、方法和分析准则。在运行经验的基础上，结合安全分析和安全研究的结果，设计中应对严重事故做如下考虑：

- (1) 使用概率方法、确定论方法和合理的工程判断的结合确定可能导致严重事故的重要事件序列；
- (2) 对照一套准则审查这些事件序列以确定那些严重事故应该在设计中给予考虑；

(3) 对于所选定的事件序列，能够减少它们的可能性或者减轻它们后果的可能的的设计修改或程序变化应该被评价。如果合理可行的话，应该实施这些措施；

(4) 应考虑核电厂的全部设计能力，包括能够在预定的功能和预期的运行工况之外使用某些系统和设备（如安全级和非安全级的系统和设备），和使用附加的临时系统和设备来将严重事故返回到受控状态和/或减轻它们的后果。应表明这些系统和设备在预期的环境条件下可以完成功能；

(5) 对于多堆厂址，应该考虑使用其他机组可用的手段和或支持，条件是其他机组的安全运行不会受到危损害；

(6) 对有代表性的和主导性的严重事故，应该制定事故管理程序。

下面的内容给出了在压水堆核电厂设计中，应考虑的典型严重事故预防和缓解措施：

(1) 通过改进系统和设备的运行可靠性，以减少发生始发事件的频率；

(2) 通过合理的系统和自动控制功能的设计，改善核电厂的瞬态特性，减少安全系统的动作和运行人员的干预；

(3) 通过多重性和多样性的系统，改进安全系统执行安全功能的可靠性，应特别注意导致共因故障的因素；

(4) 应认真研究全厂断电的可能性和处理措施；

(5) 应对停堆状态和安全壳打开时的情况给予特别的关注，特别是保证余热排出的可靠性；