

专题报告

# 中国核电的可持续发展

赵仁恺

(中国核工业集团公司, 北京 100822)

**[摘要]** 文章阐述了核能是可持续发展的能源, 是我国未来国民经济发展的主要支柱的论点, 分析了国际核电发展现状, 我国核电发展的方针政策、技术路线、现状以及共同关心的几个问题: 铀资源问题、核安全问题、核废料问题和核电国产化问题, 展望了我国核电发展的前景, 并提出了建议: 我国核电站应以现有压水堆核电站为基础, 实现国产化、标准化、系列化; 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; 尽快开始乏燃料后处理厂及其配套设施的建设。

**[关键词]** 核能; 铀资源; 核安全; 核废料; 国产化

## 1 核能是可持续发展的能源, 是我国未来国民经济发展的主要支柱之一

为了保护环境、保障人类的健康, 未来的能源应是“可持续发展和无害于环境的”这已为当今国际所共识。这是由于:

### 1.1 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1), 按1998年消费量计算, 全球能源资源已探明储量中石油仅够供人类约五十年所需; 天然气仅够供人类约七十年所需; 煤炭仅供人类约二百年所需; 天然铀仅供人类约六十年所需。由此估计, 未来二百年内全球能源资源将被消耗殆尽(见图1)。

表1 1998年全球能源资源和储量<sup>[1]</sup>

Table 1 1998 world energy resources and reserves

	世界能源委员会资料		国际应用系统分析研究所资料			1998年消费量
	探明储量	最终可采储量	储量	资源	总资源量	
E (常规石油) /EJ	6 300	8 400	6 300	6 090	12 390	142.8
折油当量/Gt	150	200	150	145	295	3.4
E (常规天然气) /EJ	5 586	9 240	5 922	11 718	17 640	84
折油当量/Gt	133	220	141	297	420	2.0
E (煤炭) /EJ	18 060	142 800	25 452	117 348	142 800	100.8
折油当量/Gt	430	3 400	606	2 794	3 400	2.4
m (天然铀) /Mt	3.4	17				0.064

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/或在现有技术条件下开采经济可行性较差的埋藏量; 总资源量是两者之和。

### 1.2 化石燃料燃烧排放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2), 我国二氧化碳排放量已占世界

[收稿日期] 2000-06-20

[作者简介] 赵仁恺(1923-), 男, 江苏南京市人, 中国工程院院士, 中国科学院院士, 中国核工业集团公司研究员级高级工程师

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4月6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 $33 \times 10^4$ 多人的生命,造成的经济损失高达 $6.252 \times 10^8$ 美元。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年代是过去一千年来最热的十年。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。

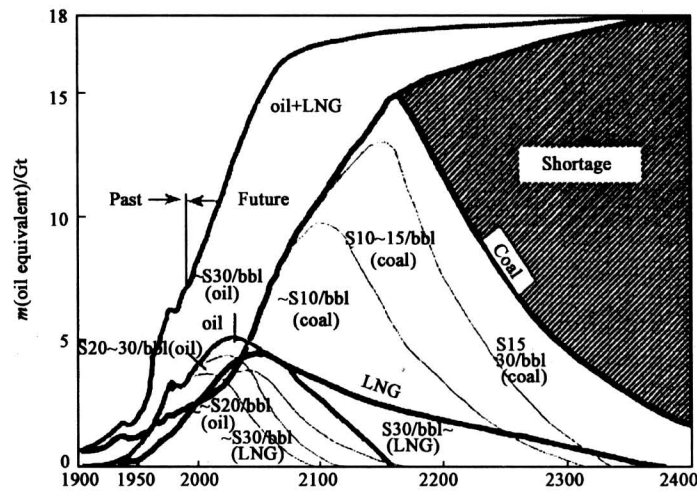


图1 全球化石燃料资源消费预测<sup>[2]</sup>

Fig.1 Estimate of the Consumption of world fossil energy resources

表2 国际能源机构公布世界二氧化碳排放  
量排行榜 (1995)<sup>[3]</sup>

Table 2 World carbon dioxide emission in rank  
(1995)

	二氧化碳 排放量/Mt	人口/ 10 <sup>6</sup> 人	人均排放量 /t·人 <sup>-1</sup>	份额/ %
美国	5 228.52	263.06	19.88	23.7
中国	3 006.77	1 200.24	2.51	13.8
俄罗斯	1 547.89	148.20	10.44	7.0
日本	1 150.94	125.57	9.17	5.2
全球	22 000.00			

大量燃烧化石燃料释放出CO<sub>2</sub>等引起的温室效应造成地球逐渐变暖,将严重破坏人类赖以生存的生态环境,全世界都很关注此事。通过里约热内卢世界环境与发展大会和1997年日本的京都会议,世界各国共同努力限制和减少向大气排放CO<sub>2</sub>,发达国家已承担减少CO<sub>2</sub>排放的义务并制订了相应份额。

中国是最大的发展中国家,近年来经济持续高速发展。已建成的秦山、大亚湾核电站,1996年共发电 $143 \times 10^8$  kWh,用70 t核燃料取代了700多 $10^4$  t原煤,减少排放10 Mt CO<sub>2</sub>。经对秦山和

大亚湾核电站进行的监测表明,核电站运行前后,周围环境的放射性水平没有变化。中国发展核电将对减少CO<sub>2</sub>排放量和保护大气环境尽自己的一份责任。为了人类的可持续发展,核能和可再生能源是今后能源发展的方向。因为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,但受到一定条件的限制,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源,是“取之不尽用之不竭”的能源。

能源是国民经济的基础产业,是制约我国经济持续发展的重要环节。改革开放二十多年来我国能源工业已得到巨大的发展,为我国国民经济的发展做出重大贡献。但当前,我国的能源结构中以燃煤为主,致使大气污染严重,且由于大量煤炭运输导致交通运输紧张。同时,我国中长期的能源供需平衡中也存在着值得关注的缺口,特别是对于东南沿海经济发达、能源资源匮乏地区,这种缺口尤为突出。因此,优化能源结构已提到议事日程上。核电在优化能源结构、减少环境污染、缓解交通运输紧张、填补能源供需矛盾等方面都将发挥重要的作用。

1997 年李鹏总理在《中国的能源政策》中写道：“核电是一种安全、可靠、清洁的能源”，“从近期来看，核电在电力工业中只是一个适当的补充”，“从长远看，我国的核电事业具有广阔的发展前景”。这已为核电的发展明确了方向。

核电已被公认为是一种唯一能够大规模取代常规能源的替代能源，它已被列入我国能源政策之中，必将是我国实现 2050 年国民经济发展战略目标所需能源的重要支柱之一。

## 2 国际核电发展现状

核能的利用经过五十余年的发展至今，世界上已有 434 座核电机组在运行，核电站装机容量已达 348.8 GW。人们已普遍认为，核能是一种安全、可靠、经济、清洁的能源。在一些化石燃料能源资源短缺的国家，已选定核能作国家解决能源需求的主能源，例如：核电所占总供电百分数在立陶宛为 77.21%，法国 75.77%，比利时 55.16%，瑞典 45.75%，韩国 41.39%，日本 35.86%，美国 18.69%<sup>[4]</sup>。

轻水堆（其中尤以压水堆居多）核电站是世界上装机容量最多的核电站，也已积累了最为丰富的经验。到 2015 年前后，目前在运行的核电站大都将面临寿期终结，需要更新换代。另一方面，根据核电和平利用的经验教训，用户对下一代核电站的安全性和经济性提出了更新、更高的要求。全世界对环境保护意识的加强也给核电的发展带来了新的机遇。因此，世界上一些核电较发达的国家，纷纷致力于先进轻水堆（ALWR）核电站技术的研究开发工作。1988 年美国编制了轻水堆核电站用户要求文件（URD），对新建的轻水堆核电站提出了一系列明确的要求，反映了国际上先进核电发展的趋势。

由美国的电力研究所（EPRI）牵头，并得到日本等其他十多个国家的响应和参加，从 1985 年起，编制关于先进轻水堆（ALWR）的用户要求文件（URD）。该文件于 1989 年编制完成，现已得到美国核管会（NRC）的批准。URD 主要针对 ALWR 核电站总体设计，电厂性能，安全性和经济性及投资保护提出了明确要求。这主要包括：

①简化安全系统，对改良型 ALWR 采用简化和改进的能动系统，对创新型 ALWR 采用非能动系统；

②核电站寿命要达到 60 a；

③可利用率要超过 87%；

④换料周期要延长到 1.5~2 a；

⑤堆芯熔化和放射性物质严重外泄的几率均要在现行核电站的基础上降低 1~2 个数量级：堆芯熔化概率为  $10^{-5}$ ，放射性物质严重外泄的率为  $10^{-6}$ ；

⑥建造周期（从第一罐混凝土到商业运行）要缩短到 3.5~4.5 a；等等。

1991 年，英国、法国和德国等欧洲国家也开始编写与 URD 相类似的欧洲用户要求（EUR）。

当前，对一些发达国家，如英美等正处於一个决策关头，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钚循环？正在进行研究如何解决国内未来能源的需求。

## 3 我国核电发展现状

### 3.1 我国核电发展方针政策

#### 3.1.1 安全第一、质量第一

中国在核电开发过程中一贯把核安全性和可靠性放在首位。为确保核电建设的质量和安全，中国已建立起完整的核电安全法规、导则和细则，并形成一整套完整的核安全监督体系、环保监督体系、核事故应急体系。中国政府运用这些法规和组织体系，对核电厂的选址、设计、建设、运行进行全面的审查和监督，保证实现“安全第一、质量第一”的目标。在核电建设中必须确保贯彻安全第一的方针，实行严格的质量管理；要注意核电运行人员的培养与训练，从严治厂，树立一丝不苟的工作作风，在核电各项活动中不断进行安全教育，提高安全文化素质。

#### 3.1.2 统一堆型

以我国已掌握的压水堆核电站技术、工业制造体系和建设营运经验为基础，以我国已有的压水堆核电站为参考，选用 300 MW 为一个标准环路，形成我国完整的国产的系列化、标准化、批量化生产的压水堆核电站体系。

#### 3.1.3 以我为主，中外合作，引进技术，实现国产化

中国是一个大国，对核电的需求量很大，中国发展核电一定要逐步走国产化道路。只有如此，才

能较大幅度地降低造价和发电成本,提高核电的经济竞争能力,核电也才能较快地发展。

秦山一期 300 MW 核电机是我国自行设计、建造和运行的原型核电机组,它是自力更生的成功范例。自主开发,掌握技术对我国核电建设和运营具有重要意义。广东大亚湾 2 套各为 984 MW 机组的压水堆核电站是利用外资成套进口国外设备建造的,70%的发电量输往香港,既有较好的经济效益,又学习了大型核电建设和管理的经验,也是一个成功的范例。由于国内资金的限制,“九五”期间已有 4 个核电工程项目开工,保持了一定的核电建设规模。通过秦山一期核电厂的建设,已经掌握了 300 MW 压水堆核电机组的设计建造技术,国产设备按投资比率已超过 70%。期望通过秦山二期工程,掌握 300 MW 标准环路的 600 MW 压水堆核电机组设计建造技术,同时适当从国外进口或联合生产某些关键的核岛设备、部件并引进技术、管理经验,从而提高核电设备制造国产化能力和比例。大亚湾核电厂的建成和岭澳核电工程的兴建将促进和加快我国全面掌握 1 000 MW 级大型压水堆核电厂技术。在下一步开展国产 1 000 MW 级压水堆核电站,将以我为主,通过引进必要的技术,密切跟踪国际核电技术发展,增强自我发展能力。充分利用我国现有的核电科研、设计、建设、管理和设备制造能力,通过学习、消化、吸收、创新,努力实现设计自主化和设备国产化,以迎接我国核电较大发展局面的到来。

#### 3.1.4 重点在经济发达的缺能地区建设核电站

我国东南部沿海地区经济发达,而常规能源十分缺乏,所需能源几乎有一半须从外地调入。随着东部经济的发展,一次能源调入量还会逐年增加。东南部地区人口稠密,经济发展速度较快,对电力的需求迫切,对电价的承受能力较高,而且集资办电的能力较强。因此,在我国东南沿海地区大力发展核电是国民经济发展的需要、是优化的选择。

### 3.2 我国发展核电的技术路线

我国核电发展的战略路线,是早已明确并正在执行的:

近期发展热中子反应堆核电站(热堆);

为了充分利用铀资源,扩大核电装机容量,采用铀钚循环的技术路线,中期发展快中子增殖反应堆核电站(快堆);

远期发展聚变堆核电站,聚变堆核电站将是人

类长远解决能源供给的主要依托。

在热中子堆阶段,当前以 300 MW 一个标准环路的 1 000 MW 级压水堆为主力堆型,走国产化、标准化、系列化的道路。

为了适应国民经济发展的需要,充分利用有限的铀资源,对乏燃料进行后处理,回收利用铀钚,走核燃料闭式循环的技术路线。

### 3.3 我国核电发展现状

#### 3.3.1 我国核电站的研究设计和建设

我国在军用核动力的基础上,经约四十年的发展,至今已经建立了比较完整的核能科研、设计和研制的体系。培养了一批高水平、有丰富实践经验的核科学技术研究设计队伍。拥有了较完整的反应堆研究设施,如高通量实验反应堆、脉冲实验反应堆、微型反应堆、零功率装置、大型热工水力实验室、力学及抗震实验室、核燃料及材料研究实验中心、计算中心等高科技设施。已具有独立自主进行 300、600、1 000 MW 级压水堆核电站研究设计的能力。

我国早在七十年代就提出利用核能发电,并选择压水堆核电站作为主力堆型,自主开发的秦山一期电功率为 300 MW 压水堆核电站,于 1985 年 3 月 20 日正式开工,1992 年 7 月 18 日达到额定功率,成功发电。80 年代引进的大亚湾压水堆核电站 2 套机组(电功率为  $2 \times 900$  MW)于 1994 年 2 月和 5 月先后投入商业运行。改革开放以来,我国核电发展形势很好,自主开发的秦山二期 2 套电功率 600 MW 压水堆核电站机组现已进入主设备安装阶段。从国外引进的岭澳 2 套电功率 1 000 MW 压水堆核电站机组、秦山三期 2 套电功率 700 MW 重水堆核电站机组和田湾(连云港)2 套 1 000 MW 压水堆核电站机组均正在加紧建设中。这样到 2005 年全部建成后我国核电总装机容量将达到 8 700 MW。据有关方面预测,我国核电站装机容量到 2010 年要达到电功率 20 000 MW,2015 年要达到 30 000 MW,2020 年要达到 40 000 MW。

我国秦山核电站和广东核电站自 1991 年投产以来,运行情况良好,有相当的经济效益,从未发生过核事故。由于我国核电站设置了放射性废物处理系统等安全措施,废物经严格处理后排放,保证了放射性物质排放水准。两座核电站还制定了比国家限值更低的电站排放限值,实际排放结果均比各自电站排放限值低 1~2 个数量级,远远低于国家

规定限值。因此经十年来的检测数据表明这两座核电站对环境毫无影响。

我国已自主设计建造了电功率 300 MW 和 600 MW 压水堆核电站，目前当务之急是尽快开展 1 000 MW 压水堆核电站的研究设计和建设，尽早实现我国核电标准化、系列化、国产化体系。与此同时，为了提高核电站的安全性和经济性，赶上世界先进水平，应立即开展当前国际上正在进行的先进压水堆核电站的研究设计和建设。在这方面我国尚在起步，为了缩小差距，我国必须将建设电功率 1 000 MW 级核电机组和开展先进压水堆核电站的研究设计纳入国家计划，加大科技投入，尽快攻克技术难关，掌握关键技术，为国内核电技术的发展适应国民经济的需要和赶上国际水平奠定坚实的基础。

### 3.3.2 核燃料循环

我国是有核国家，已建成从铀矿地质勘探、采冶、转换、铀同位素分离、核燃料元件制造直至堆后乏燃料处理的一整套完整的核燃料循环体系。为向秦山核电厂提供核燃料，1984 年在宜宾核燃料元件生产厂建成了一条专用生产线，在成功地生产了秦山 300 MW 核电厂燃料组件的基础上，又从法国 FRAGEMA 公司引进技术建成了制造 1 000 MW 级核电厂燃料组件的生产线。国产核燃料组件已成功地用于秦山和大亚湾核电站，通过实际运行考验，证明元件质量是符合要求的。我国已具备生产 300 MW、600 MW 和 1 000 MW 级核电厂燃料组件以及其他反应堆燃料元件的能力。中国已建成和运行了气体扩散法铀浓缩工厂，但分离功尚不能满足核电发展规划的需要，近年来从俄罗斯引入了气体离心分离法机组，并接受 IAEA 的安全保障。中国正在研究开发国产化的离心分离技术，同时激光分离法的研究工作也取得了一定的进展。

我国已决定对核电厂乏燃料进行后处理，采用封闭式的核燃料循环，进行了轻水堆乏燃料后处理的研究开发工作。压水堆乏燃料的后处理中间试验厂正在建造，预计在 2002 年建成，待取得设计、建造、运行经验后再建造大型后处理厂。

### 3.3.3 核能科研开发

我国已经建立了比较完整的核能科研、设计和研制的体系，培养了一批高水平、有丰富实践经验的核科技队伍，拥有了较完整的反应堆研究设施，已具有以我为主进行 1000 MW 级压水堆核电站的

设计、设备制造、建造和运行管理技术能力。

我国高技术发展计划（即 863 计划）中，在核能方面选定了三种先进反应堆技术作为发展的主要方向：快中子堆、高温气冷堆和裂变聚变混合堆。

1) 中国原子能院正在进行热功率为 65 MW（电功率 25 MW）的钠冷实验快堆的设计建造工作，技术上与俄罗斯合作。目前初步设计已完成，可行性报告已获批准，计划在 2000 年上半年浇灌第一罐混凝土，2004 年建成。建造该堆的目的是锻炼队伍，培养人才，为下世纪发展商用快堆打下技术基础。

2) 清华大学核能技术研究设计院负责开发的 10 MW 高温气冷实验堆将于 2000 年底建成，达到临界。它的建成将标志我国在高温气冷堆科学技术方面处于国际领先水平。

3) 裂变聚变混合堆是作为聚变的早期应用，利用聚变中子生产核燃料和嬗变长寿命锕系核素，该堆的研究开发单位是核工业西南物理研究院和中国科学院等离子体物理研究所。目前已经完成了功率 100 MW 的裂变聚变混合堆的详细概念设计，并在堆芯物理、材料、安全分析等方面做了大量的研究工作。

此外，1990 年清华大学核能技术研究设计院建成了 5 MW 低温核供热实验反应堆，十年来一直成功地运行着，并开展了 200 MW 核供热堆的设计建造工作。核供热反应堆为解决城市集中供热，减少煤炭运输和燃煤带来的环境污染开辟了新的途径。正筹备在东北地区建设一座 200 MW 核供热堆。

## 4 有关发展我国核电共同关心的几个问题

### 4.1 我国发展核电铀资源问题

根据世界能源委员会发表的 1998 年全球能源资源和储量数字，其中天然铀资源的探明储量为 3.4 Mt；最终可采储量为 17 Mt；1998 年消费量为  $6.4 \times 10^4$  t。以 1998 年消费量计，则目前已探明储量仅可供人类约六十年所需。

由于世界上铀资源有限，如何充分利用这有限的铀资源是当今国际上的一个重大课题。

天然铀中含有的易裂变元素 U-235 只占 0.7% 左右，其余 99% 以上是不裂变的 U-238。现在的压水堆以及各种热中子堆都是以 U-235 作



为燃料，因此天然铀在热中子堆中最多只利用了其中的1%左右。这对天然铀资源的利用是一个极大的不足之处。但是，U-238吸收中子经衰变后可以生成另一种易裂变元素Pu-239（钚-239）。一个U-235或Pu-239原子核裂变，除释放出能量外，同时还平均产生2个多中子，其中一个中子维持链式反应，剩余的一个多中子如果被U-238吸收，使它变成Pu-239，就可以在生产能量的同时，又生产燃料。如果生产出的燃料超过消耗掉的燃料，就称为“增殖”。因此，想充分利用在天然铀中占90%以上的不裂变的U-238，使之变成易裂变的Pu-239，实现“增殖”的目的，比较理想的是快中子增殖堆。增殖生产出的燃料与消耗掉的燃料之比称为“增殖比”。一座快堆核电站在运行的同时，又能生产出能供同等功率快堆使用的燃料量的时间称为“倍增时间”。增殖比大，倍增时间就短。如果能使快堆的增殖比达到1.5左右，则倍增时间可缩短到十年左右。

由于快堆能把U-238转变为可裂变材料Pu-239，从而把天然铀的利用率从热中子堆的1%左右提高到60%~70%。因此，快堆在核能利用战略布局中，占有十分重要的地位。

现有铀资源，如果裂变热堆采用核燃料一次通过的技术路线，则世界全部铀资源仅供人类数十年之需；如果裂变堆采用铀钚循环的技术路线，发展快中子增殖堆，则全世界铀资源将可供人类数千年之需。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”提供所需能源。因此，可以得出一个结论：铀资源不是我国发展核电的制约因素。我国核电完全可以根据自己的需要与可能进行发展。

#### 4.2 核安全问题

自从1954年6月前苏联的第一座实验性核电站运行发电，至今已经45 a了。截止到1998年底全世界正在运行的核电机组共437座，装机总容量达348.8 GW，累计运行已近 $10^4$ 堆·a。在近半个世纪的核电发展史上，除1979年3月28日美国三哩岛核电站和1986年4月26日前苏联切尔诺贝利核电站的两起核事故外，核电的安全记录是良好的。无论是生产过程中的人员伤亡，还是对环境的不良影响都远远优于其他工业部门。核电是安全、清洁的能源，这已是世界能源界一致公认的结论。

轻水堆（压水堆和沸水堆）是当前世界上最成

熟的堆型。目前世界上已运行的核电站中，60%以上是压水堆，四十多年来，除发生过三哩岛事故以外，压水堆核电站的运行记录一直十分良好。此外，据1998年第1期“简氏国际海军”报导，至1998年1月止，全世界累计已经建造了核潜艇484艘，建造了潜艇用反应堆686座，这些反应堆主要都是压水堆。虽然国际上有不少各种核潜艇事故报导，但从未见有核潜艇反应堆事故的报导。压水堆在核潜艇上已安全使用了四十多年。因此，可以说迄今为止，压水堆是积累运行堆年经验最多的堆型，是最成熟的堆型。

为了保证核电站的安全运行和保证公众和厂内人员所受的辐射剂量在任何情况下均不超过规定，并符合合理可行尽量低的原则，经过多年大量的研究分析、试验验证和实践经验的积累总结，对核电站采取了许多有效措施，其中主要的是：

##### 4.2.1 保证在事故后不发生堆芯融化

为此，必须确保：

- 1) 在任何情况下能将反应堆停闭并维持在稳定停堆状态。
- 2) 在任何情况下能导出停堆后的堆芯余热。
- 3) 在任何情况下堆芯不会干涸，都能浸泡在水中。

##### 4.2.2 采用纵深防御原则

1) 建立一套从设计、设备、施工到运行和核电站管理的严格的质量保证体系和监督体系，以保证核电站能够在预定的参数和条件下安全、可靠、正常地运行。

2) 在发生偏离正常或瞬态运行参数和条件而又不能及时予以纠正的情况下，为了保证设备系统的完整性，不使事故进一步发展，设置了一套完整的控制和保护系统，能对核电站不正常的运行进行监测、控制、报警直至停堆。

3) 在万一发生了事故情况下，例如反应堆一回路主管道破损事故——失水事故，核电站设有一套可靠的安全设施，以防止堆芯烧毁，不使事故进一步扩大，使从一回路中泄漏出的放射性物质包容在安全壳内，不向外界扩散，保证环境安全。

##### 4.2.3 采用多层屏障保证放射性物质包容在一定范围内

1) 第一层屏障：燃料包壳。燃料芯块叠装在锆合金管包壳中，密封起来，组成为燃料元件棒，它能把核燃料裂变时产生的大量放射性裂变产物密

封在燃料包壳内。

2) 第二层屏障：反应堆冷却剂压力边界（反应堆一回路系统）。它包括反应堆压力壳、蒸汽发生器、主泵及管道等。当第一道屏障燃料包壳万一发生破损，放射性物质漏到一回路水中，但它仍然是被密封在一回路系统中，即反应堆冷却剂压力边界中。

3) 第三层屏障：安全壳。反应堆及一回路系统均设置在一个安全壳内。安全壳具有良好的密封性能，能承受万一发生严重事故（如失水事故）引起的内压和温度剧增，能够可靠的把放射性物质包容在安全壳内，保证事故中向环境释放的放射性物质在允许限值之内。

#### 4.2.4 提高人的安全文化

要在与核电有关的所有工作人员中树立起一种安全高于一切观念，并且把这种观念具体落实到各项生产活动之中。

为了贯彻这套安全体系的精神，世界各国的核能界做了不懈的努力。美国的电力公司制定了一个用户要求文件，对新建设的核电站提出了明确的、更高的安全要求，把堆芯熔化概率从现行核电站的  $10^{-4}/\text{堆}\cdot\text{a}$  降低到  $10^{-5}/\text{堆}\cdot\text{a}$ 。大量放射性物质泄漏的概率降低到  $10^{-6}/\text{堆}\cdot\text{a}$ 。用户要求文件虽然不是官方的规定，但它得到了世界核能界的广泛认同，实际上已成为新建核电站的奋斗目标，代表了提高核电安全性的一种国际趋势。此外，以美国为代表的若干核电先进国家还在积极开发非能动安全系统的新一代压水堆核电站，这种核电站可以把堆芯熔化概率进一步降低到  $10^{-7}/\text{堆}\cdot\text{a}$ 。

#### 4.3 核废料问题

从后处理厂和核电站等出来的核废料，依其放射性水平，一般分为高、中、低三类。我国对中、低放废物采取区域处置的方针，放射性废物的处理和处置在技术上和工艺上都已取得明显进展。低放废物沥青固化、水泥固化技术已开发成功并投入运行，中放废液深地层压裂技术已进入试验阶段。我国计划在西北、华东和华南修建中低放废物贮存库。西北中低放废物处置场已建成并已在 2000 年初开始接收废物。广东北龙处置场准备接收华南地区的中低放废物（目前是大亚湾核电厂），设计已批准，计划于 2002 年建成并接收中低放废物。浙江处置场准备接收华东地区的中低放废物，正在进行选址工作。

长寿命强放射性的高放废物的处置有两条可行的技术途径：

一是深地层埋藏。即将这类废物处理成固化的玻璃块，选择稳定的地质层打洞深埋，使这些固化块与外界环境隔绝，阻断放射性物质进入生物链的途径。国际核能界公认这种方法是有效的。适合于做这种埋藏的地质层也是不难找到的，即使象日本这样多地震、火山活动活跃的岛国，高放废物玻璃固化体的地层处置也在“全国几乎所有的地区都可进行”。我国对这项工作十分重视，1986 年就成立了高放废物地质处置专家协调组，在选址、场址评价与处置库设计和性能评价等方面开展研究工作，并已在我国西北地区初步选定了预选场址。

二是通过中子嬗变将长寿命的放射性核素转变为短寿命的，从而使得处置问题大为简化，办法是将长寿命的放射性核素放入快中子反应堆中作为“燃料”，利用快中子的核反应将它们“烧掉”，其产物是短寿命的核素，便于处置，而且“燃烧”过程中产生的能量还可以作为副产品利用。这种处置方法较为理想，国际上正在进行研究，我国也在开展这方面的研究。

上述这些高中低放射性废物的处置方法是目前国际上通行的也是共同认可的方法。

#### 4.4 核电国产化问题

核电是支持我国国民经济快速发展的重要支柱之一，核电在我国将要得到较大的发展。依靠进口或引进核电是不可能得到发展的，发展我国核电必须依靠自己，必须国产化。

核电国产化的标志是：自主设计、自主制造、自主建造、自主运营四个主要方面。而设计自主化是核电国产化的关键与核心。只有实现了设计自主化，才能把技术决策权真正掌握在自己手里，才能实现自主采购，自主管理，才可能最终实现核电建设国产化。只有实现了国产化才能降低工程造价与上网电价，核电才有生命力。只有实现了国产化，才能摆脱外国对我国的控制。只有实现了国产化，才能制定出符合我国国情，有效地吸收外国经验，确保核电安全的中国核电管理体系，规范和制度。

从技术上而言，核电是高新科技产业，从核电的设计、建造和设备制造，涉及多个行业，结合和依托核电国产化，不仅可以拉动经济增长，而且有利于高新技术的发展，改造传统产业，推动制造业技术创新和高科技产业化的进程。另外，还可以有

效扩大内需,增加就业。核电的国产化给国内的建筑市场也带来较大的机遇。

目前我国各方面都已具备“以我为主、中外合作、引进技术、实现国产化”的条件,核电国产化已列为我国发展核电的政策之一。

## 5 我国核电发展技术展望和建议

我国目前建成和在建的核电站总装机容量为 8.7 GW,一般预计到 2010 年我国核电装机容量约为 20 GW,2020 年约为 40 GW。到 2050 年,根据不同部门的估算,我国核电装机容量可以分为高中低三种方案:高方案为 360 GW;中方案为 240 GW;低方案为 120 GW。

我国核电发展的技术路线已定为当前发展压水堆,中期发展快中子堆,远期发展聚变堆。据此,试对我国从现在到 2050 年左右核电发展技术情况作一粗略分析。

### 5.1 假设

(1) 在满足一定的装机容量条件下取最低天然铀需求量。

(2) 1 000 MW 级压水堆核电站 (PWR-1000) 年产钚量约为 150 kg。1 000 MW 级快堆核电站 (FBR-1000) 初装氧化物燃料约为 3 700 kg 钚。则每 25 堆·a (PWR-1000) 所生产的钚可供一座 FBR-1000 的初装料。

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

(4) 快堆核电站的投入时间取 2025 年。

(5) 我国到 2050 年核电装机容量取 120 GW (低方案)。

### 5.2 分析

根据上述假设对我国压水堆核电站 (PWR) 和快中子增殖堆核电站 (FBR) 发展状况进行析。(图 2)

#### 5.2.1 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 a (URD 要求),我们现在动手建设的 1 000 MW 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 2010~2040 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。此项分析将受如下不确定因素的影响:

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延长。

2) 此发展期随我国 2050 年前核电规模的增减而延长或缩短。

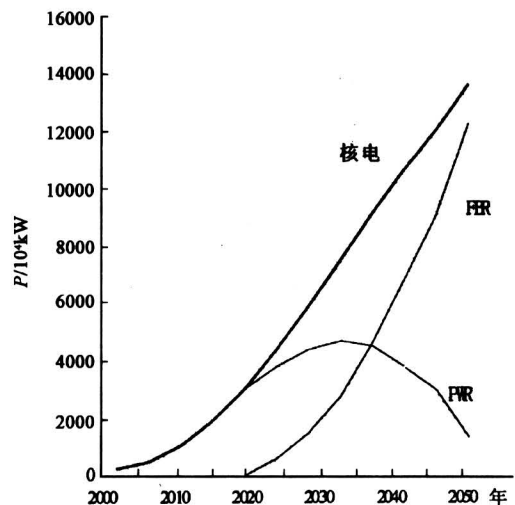


图 2 中国核电发展预测 (低方案)

Fig.2 Forecast of Chinese nuclear power development

#### 5.2.2 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:

1) 压水堆核电站的有效发展利用期 (大规模发展期) 约为在 2010~2040 年这 30~40 a 期间,2040 年以后即进入平衡期或衰减期。

2) 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。

3) 聚变堆核电站,将是可以从根本上“永远”解决人类能源的供需矛盾。

在此情况下,如何多快好省的发展我国核电,国际上核电发展经验的某些方面值得我国借鉴: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、管理的经验和水平都能在同一种堆型中得到充分的积累和发展提高，建设周期和成本可以降至最低，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和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。切忌发展多堆型。

### 5.3 建议

(1) 我国核电站应统一堆型，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) 重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，对我国能源发展及人类环境越为有利。

(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。

### 参考文献

- [ 1 ] 王庆一 . 1998 年全球能源资源和储量 [J] . 能源研究政策, 2000 ,(1):10
- [ 2 ] Kikuchi M. A rationale for fusion energy development in Japan [A]. In: The American Physical Society & ANS ed. Proceeding of the 1999 Fusion Summer Study [C]. Snowmass, Colorado, USA, 1999
- [ 3 ] 国际能源机构公布世界二氧化碳排放量排行榜 (1995) [N] . 参考消息, 1997-11-20
- [ 4 ] 国际原子能机构 . 世界核电现状 [J] . 国际原子能通报, 1999, 41 (2)

## Sustainable Development of Chinses Nuclear Power

Zhao Renkai

(China National Nuclear Corporation, Beijing 100822, China)

[Abstract] Nuclear power is considered a sustainable energy resource, and it is a very important pillar for the development of Chinese national economy in the future. In the paper, the present status of nuclear power development in the world and China is described. The general and specific policies and technical route for Chinese nuclear power development, and several problems commonly concerned with Chinese nuclear power development, such as uranium resources, nuclear safety, radioactive wastes and localization of nuclear power in China are expounded and analyzed. Finally, the prospects of nuclear power development in China are forecasted and some suggestions put forward. Further development of nuclear power in China should base on the available PWR' s technology and to achieve localization, standardization, serialization The Fast Breeding Reactor plays a very important role during the course of nuclear power advancement, it should be strongly promoted and supported. At the same time, planning and construction of reprocessing plants together with necessary related installations should be carried out as soon as possible.

[Key words] nuclear energy; uranium resources; nuclear safety; radioactive westes; localization

\*

\*

\*

《中国工程科学》(月刊) 是中国工程院院刊  
欢迎读者直接向本刊编辑部订阅