

948

7C413
A14a

先进核动力反应堆

马昌文 徐元辉 编著



A0948101

原子能出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

先进核动力反应堆/马昌文,徐元辉编著.—北京:原子能出版社,2000.9
ISBN 7-5022-2205-7

I. 先… II. ①马… ②徐… III. 反应堆 IV. TL4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 42863 号

内 容 简 介

核能动力是一种资源丰富,且极少污染环境的清洁能源。经过几十年来的发展,核能在世界能源结构中,已占有重要的地位,尤其在化石燃料逐渐枯竭,人类对保护环境日益重视的条件下,核能的重要性更加突出。在新的世纪中,要求核电必需具有更高的安全性、可靠性和经济性,于是各种新型堆(下一代动力反应堆)应运而生。

本书对目前世界新发展的所谓下一代核动力反应堆的几种类型,它们的发展过程、主要技术特点和先进之处,与“用户要求”的比较等作了较为系统的介绍和说明,这些堆型包括先进型沸水反应堆、简化型先进沸水反应堆、先进型压水反应堆、固有安全的供热反应堆和被誉为可能会是下一代主力堆型的高温气冷反应堆等。

本书是作者在清华大学核能技术设计研究院研究生班上近几年的授课讲稿,目的是使研究生们既能通过本课程了解本院的主要研究方向及成果,又能广泛了解核能领域的新发展。对核动力专业、热能动力专业的技术人员和动力企事业单位管理人员,以及大专以上学校动力及热能利用有关专业师生们都很有参考价值。

原子能出版社出版 发行

责任编辑:赵志军

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

北京朝阳科普印刷厂印刷 新华书店经销

开本:850×1168mm 1/32 印张:8.75 字数:232 千字

2001 年 2 月北京第 1 版 2001 年 2 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000

定价:29.00 元

第一章 概 述

1.1 前言

核能是一种清洁的能源,在环境污染的后果日益受到重视的今天,核能动力的发展又受到了新的关注。资料表明,目前作为主要能源的有机燃料中石油和天然气正日趋枯竭,即使是蕴藏量很大的煤,在 100 年内,价格也将上升到难以接受的程度,更何况燃烧这些宝贵的化工资源,以取得动力所需的热能,在经济上是极不合理的。

核动力站在正常运行中基本上不排出 SO_2 , NO_x , 飘尘等污染物质,即使有微量的放射性物质排放,其排放量也远小于同功率的燃煤动力厂的放射性排放量(据清华大学核能技术设计研究院对国内某核动力站所作可行性分析,核动力站排出的放射性仅为同功率燃煤动力站放射性排放量的 1% 左右),而且也远小于环境中天然存在的放射性本底,对人类不会造成任何危害。

核能利用的发展使得可供利用的核燃料的资源愈来愈丰富,从最初只能利用铀-235、钚-239 到现在铀-238(在快增殖反应堆中)和钍(在铀钍循环反应堆中)也已加入到核燃料的行列,当利用氘和氚聚变核能的发展研究完成时,人类可以说最终解决能源资源的问题,再也不会为能源匮乏而发愁了。

本书的目的,在于向核动力专业和动力类各专业的研究生及从事核动力和动力领域工作的工作人员、技术人员和青年教师介绍核动力反应堆的新发展情况,和一些正在发展中或已建成的先进核动力反应堆的状况及特点。

作为动力堆的重要堆型——水-水型反应堆,近年来发展了先进

型沸水堆(ABWR),简化型先进沸水堆(SBWR),先进型压水堆(APWR,CPWR)。快中子增殖反应堆(FBR)也属一种先进反应堆。清华大学核研院在先进型反应堆方面,发展和建造了专供热反应堆(DHR)和高温氦冷反应堆(HTGR)等。

另外,聚变-裂变混合反应堆、能量放大器、聚变反应堆等也都正在发展中。都可以说是世界核动力发展的前沿。

了解世界发展的前沿,对推动我国核能事业的发展,是十分重要的。

1.2 核动力的发展现状

1. 世界核动力现状

迄今为止,核能的利用还仅限于裂变能,聚变能的利用还只能是远景。核燃料单位重量贮能很高,每吨燃料元件所发出的能量约相当于30万吨煤燃烧所发的热。核裂变产生的废物大都被滞留在燃料元件内,燃料元件又被重重保护着,所以基本上没有有害物质(放射性物质及如 CO_2 , SO_2 , NO_x 和微尘颗粒等)排放,是一种清洁的能源。因为它寿命长、消耗少,设备初投资虽然较高,但燃料费用和运行费用较低,所以其能量成本一般说来比燃煤或油的动力厂要低,这使得很多国家纷纷发展核能动力。到1998年初的统计,世界上已有30多个国家和地区建有核动力厂,另有几个国家的核动力厂正在建设中,世界核动力厂概况见表1.1。

在上述国家和地区中,核动力在本国或本地区总动力容量所占的份额各有不同,多的高达85%以上,低的则仅占千分之二左右(见表1.2,1997年统计)。

世界上现在正在运行的动力反应堆共有448座(至1998年)。本书将要讨论到的先进型动力反应堆就是在这些现有的堆型上发展起来的,现有的动力反应堆的主要堆型见表1.3。

另外正在建造中和计划兴建的还有50座反应堆,功率为34945MW。其中包括中国在建的4台压水堆(总功率4000MW)和2

表 1.1 世界各国家和地区核动力概况

国家或地区	核动力厂容量/ MW	运行中的动力 反应堆数	占世界核电容量 百分比(%)
阿根廷	935	2	0.27
亚美尼亚	400	1	0.11
比利时	5527	7	1.6
巴西	526	1	0.18
保加利亚	3420	6	0.99
加拿大	15439	22	4.47
中国	2100	3	0.61
古巴	840(在建)	0	
捷克	1632	4	0.47
芬兰	2310	4	0.66
法国	57373	55	16.61
德国	22237	20	6.44
匈牙利	2310	4	0.66
印度	1695	10	0.49
日本	40970	51	11.86
哈萨克斯坦	135	1	0.04
韩国	9120	11	2.64
立陶宛	2760	2	0.8
墨西哥	1308	2	0.38
荷兰	507	2	0.14
巴基斯坦	125	1	0.036
罗马尼亚	70	1	0.2
俄国	19849	26	5.75
斯洛伐克	1632	4	0.47
斯洛文尼亚	620	1	0.19
南非	1840	2	0.54
西班牙	7188	9	2.1
瑞典	10075	12	2.9
瑞士	3072	5	0.89
中国台湾	4884	6	1.41
乌克兰	12095	14	3.5
英国	12728	35	3.68
美国	100459	109	29.08
总计	345496	433	约 100

表 1.2 各主要核国家或地区核动力
占其国内(地区内)总动力容量的百分比

国家或地区	核电份额(%)	国家或地区	核电份额(%)	国家或地区	核电份额(%)
立陶宛	87	西班牙	36	阿根廷	5
法国	80	中国台湾	34	荷兰	5
比利时	58.9	乌克兰	30	南非	4.5
斯洛伐克	54	芬兰	29	印度	2
匈牙利	43	德国	26	巴基斯坦	0.9
瑞典	42	捷克	21	中国	0.89
韩国	40	英国	17	哈萨克斯坦	0.5
日本	39.6	美国	14	巴西	0.2
瑞士	38	加拿大	13		
保加利亚	37	俄罗斯	13		

表 1.3 现有动力反应堆分类(截至 1998 年初)

堆型	运行堆数	总功率/MW ^①	占总功率的份额
压水反应堆	251	235080	0.6381
沸水反应堆	95	82920	0.2251
重水反应堆	34	19555	0.0531
水-石墨反应堆	14	14600	0.0396
快中子反应堆	7	2547	0.0069
气冷堆	35	13116	0.0356
其它	12	590	0.0016
合计	448	368408	1.00

①本书中功率如不特别说明均指电功率。

台重水堆(总功率 1400MW)。

压水堆发展较早,有核潜艇动力的经验作为基础,技术上成熟,在世界已建成的反应堆中居多数。

在世界核电发展中,法国的状况很有特色,它在 1969 年以前主要是发展气冷反应堆,在 1969 年决定大力发展压水堆后,即停止兴建气冷堆而大量地成批建造压水型反应堆核电站,使其核电发展的速度大大高于其它国家,1994 年时,核电装机容量已占全国发电容

量的 80% (气冷堆全部停用,水电占 17%,其它的仅占 3%,即发电方面几乎只有核电和水电两种)。目前法国的核电站全是压水型的,共有 57 座压水动力堆在运行。还有 4 台正在建造中,法国有机燃料资源不丰,较早意识到核电的重要意义,决定本国国策以核电为发展动力的重点,统一的堆型使核电站规格划一,便于批量生产,加快了核电发展的速度,现在法国是以核电为主的工业强国。

目前法国正在与德国等欧洲国家致力于发展先进型压水堆。

另一个在核动力发展方面有特色的国家是日本,日本也是有机燃料资源匮乏的国家,因而相当注重核电的发展。目前核电容量已占到全国电力容量的 40% 左右。核电在其国内电力供应方面,占有举足轻重的地位。

日本发展核电在早期是以压水堆和沸水堆为主,并兼顾快增殖堆和高温气冷堆的发展。现在日本共建成核电站 53 座(截至 1997 年初),其中压水堆核电站 23 座,沸水堆核电站 28 座,快增殖堆和高温气冷堆各 1 座。

日本在近期主要致力于发展先进型水堆,特别是沸水堆,它是世界上唯一已建成先进型沸水堆 (ABWR) 的国家。在计划中,尚将陆续建造 8~9 座沸水堆核电站,而压水堆方面则没有计划兴建的项目,看来,日本似乎更偏爱沸水堆。

2. 我国核动力的发展现状

(1) 我国发展核动力势在必行

我国能源消费结构中,煤和石油消费占到 96.4% (1997 年 6 月数据)。煤和石油的燃烧,造成严重的环境污染,恶化了人类的生存条件,危及子孙后代,我国的许多城市,污染物浓度已达世界前列,据国家环保局和世界银行统计,1995 年国内、外大城市大气污染物浓度见表 1.4。世界卫生组织推荐标准及我国卫生标准亦附于表后,供参考。

表 1.4 国内外大城市大气污染物浓度[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

	总悬浮粒子	二氧化硫	氮氧化物
北京	370	94	123
天津	306	82	50
上海	246	53	75
重庆	322	338	69
沈阳	374	105	74
西安	374	67	56
济南	472	132	45
太原	568	211	55
广州	295	57	129
贵阳	330	424	59
纽约	50	70	
伦敦	23	40	
洛杉矶	99	5	
东京	55	22	
曼谷	200	13	
雅加达		300	
世界卫生组织推荐标准			
年平均	60~90		
日平均	150~230 ^①		
国家二级标准			
年平均		60	
日平均	300		100

①为总悬浮粒子加上二氧化硫。

除了悬浮颗粒、二氧化硫和氮氧化物等人们熟知的有害物质之外,煤和石油的燃烧还排出了大量的二氧化碳,它所造成的温室效应对人类环境影响很大,受到世界上日益增长的关注,我国是世界上最大的产煤国,年产煤 13.6 亿吨(1995 年)以上,煤消耗量占世界第一,石油消耗量少于美、日两国占世界第三。燃烧煤和石油排放出大量的二氧化碳,据 1997 年 4 月“国际能源展望”(美国能源信息署)估计,1990—1995 年中国共排放 8.21 亿吨 CO_2 ,仅次于美国而居世界第二。我国政府已于 1992 年在里约热内卢召开的联合国环境与发

展大会上庄严地作出了努力降低 CO₂ 排放的承诺,然而能源消费又不能缩减。目前技术成熟,能代替煤和石油提供能源的除水力外,就只有核能了,而水力受地区和资源的限制,因此,从环境的意义出发,采用清洁能源——核能是势在必行。

发展核能对减少污染的效果是显著的,如欧洲的统计数据表明,法国因电力主要靠核能,其 CO₂ 排放量比周围邻国低许多(见表 1.5)。

表 1.5 欧洲一些国家的 CO₂ 排放量

法国	93 t/(GW·h)
荷兰	602 t/(GW·h)
英国	640 t/(GW·h)
德国	671 t/(GW·h)
丹麦	869 t/(GW·h)
卢森堡	1258 t/(GW·h)

另一方面,由于目前我国能源消费以煤和石油为主,而煤产地集中在山西、陕西和内蒙,油则在东北和西北,距离我国能源主要消费地区及工业集中的东部沿海区域相距较远,造成北煤(油)南运,西煤(油)东运的严重运输负担,据统计 1995 年我国煤炭铁路平均运距为 561 km,占铁路总货运量(包括石油)的 47.7%。水运运距达 3028 km,占水运总货运量的 27.2%,石油则占到水路货运量的 23.5%,煤油合计占水力运量的 50.7%。

这样庞大的运输量不仅造成有的地区能源供应的困难,而且使交通紧张、运输不畅。

如果用核能来取代部分煤和石油,必将使交通紧张得到缓解,因为核燃料贮存的能量密度很大。例如,产生 200 MW 热量的动力厂每年消耗的核燃料大约为 1 吨,而产生同样功率的燃煤动力厂则需要燃料约 30 万吨/年,而且还要运走大量的灰渣,在运输力量需求方面的差异是显而易见的。

从能源资源上看,我国的石油产量已难以完全满足生产发展的需要,煤的开采成本也将愈来愈贵,用新的能源(核能)来部分代替煤和石油是一种改善能源结构的合理的选择。

(2)我国核动力发展的现状

我国的民用核动力事业起步较晚,早期核动力仅限使用于核潜艇。1992年7月我国第一座核电站——秦山1期核电站投产,结束了我国大陆没有民用核动力的历史,这是我国自行设计和建造的核电站,属于压水堆类型,功率为300MW。接着广东大亚湾1号和2号核电站相继于1993年和1994年投入运行,功率各为900MW,此外,在我国台湾尚有6座核反应堆,总功率为4884MW,除上述已建成、正在运行的核电站外,我国已动工修建秦山二期核电站(压水堆,功率 2×600 MW)和广东岭澳核电站(2台功率各1000MW的压水堆),秦山三期(二台重水型反应堆,功率各700MW)和江苏田湾核电站(2台1000MW压水堆)正积极筹建中。我国台湾也正在兴建另一座包含两台反应堆的核电站。

目前我国大陆已投产的核电厂(秦山1期和大亚湾1,2号)总功率为2100MW,占电力装机容量的0.89%,我国台湾(2台压水堆,4台沸水堆)核电总功率4884MW,占电力装机容量的34%。

为了满足我国经济发展的需要,到2015年,我国规划要建造大量的核反应堆,使核电功率占到我国总电力容量的4%左右(到2015年,规划要求将火电的比例由目前的98.1%降为71%~74.5%,水电由1.8%上升到20%~23.5%)。为了今后我国核动力的发展,国内正在大力进行先进反应堆的开发研究工作,以中国核动力研究院为主,正在研究发展先进压水堆,以中国原子能科学研究院为主,正在研制一座试验快中子增殖反应堆,清华大学核能技术设计研究院也正在研究发展高温氦冷反应堆和供热式反应堆。其中一座10MW的高温氦冷反应堆预计将于2000年底以前建成,一座5MW的供热试验堆已于1989年建成,现正在准备建造一座商用供热反应堆。

1.3 核动力的近期发展和远景

1. 核动力近期发展面临的问题

核动力近期发展面临着很多重要的问题,这些问题不能很好解决,势必严重地影响核能的应用。

核动力面临的最重要的问题是提高其安全性。如前所述,自核能动力面世以来,已建成的核动力反应堆多达 480 多座,在几千个堆年的运行中出过严重事故的只有 2 座,即三里岛核电站(美国)事故和切尔诺贝利核电站(乌克兰)事故,尽管事故次数不多,但后果却极为严重,尤其是切尔诺贝利核电站事故,除造成重大的人员伤亡外,还有大量放射性物质外泄,此事故给核能事业的发展带来了严重的影响,使欧美多国反核力量大增,在有的国家,核能面临存、亡之争,更不用说发展了。人们在震惊之后,经过一段沉寂,终于冷静下来。核能具有众多的优点,事故概率也是各行业中最低的行业之一,已发生的事故也应该是可避免的,这样,欧、美纷纷提出了核能动力的新的“用户要求”,这些“用户要求”的关键在于提高核动力站的安全性,凡不能满足这些要求的核动力站将不允许进行建造,下一节我们将对“用户要求”进行讨论。

核动力面临的第二个重要问题是改善其经济性。本来核动力的经济性经数十年的发展,已得到相当的肯定,由于核电厂系统较复杂,有重重的安全设施,所以核电厂的初投资比燃煤或石油的动力厂要高,但核电厂燃料消耗量很少,因而燃料成本较低,作为综合经济指标的电能价格(包括投资折旧、燃料成本和运行费用),在规模发展的基础上进行比较,核电要比火电便宜。例如据 1995 年统计,以核电为主的法国,在欧洲各国电价中是比较便宜的(见表 1.6)。

但是,随着对核能安全的要求愈来愈高,审批过程更严,建造周期更长,使得核能的成本也在上升。

核能要在能源领域得到发展,必须在经济性方面,能与燃煤和石油的火电厂相竞争,这一要求,也已反映在新的“用户要求”中。其它

表 1.6 几个国家电价相对比较表(以法国电价为 100)

国家	电价
法国	100
意大利	193
比利时	118
德国	112
西班牙	122
美国	127
荷兰	105

问题还有废料及乏燃料的贮存和处理等,也需在发展中求得解决。

2. 核动力厂的“用户要求”

为了保证核动力在安全、适用、经济的基础上向前发展,美国和欧洲的一些组织和用户,纷纷提出了自己的“用户要求”,不同版本的“用户要求”内容基本上是一致的,要求在 21 世纪投入运行的核动力厂,都必须满足此文件所提出的条件,否则,将难以为用户所接受,也难以被安全评审当局批准建造。下面着重介绍美国的“先进水堆用户要求”,它是由美国电力研究所(EPRI)及一些国际电力公司,在美国能源部的密切合作下编制的,这份文件编制的目的是为 21 世纪核电厂提供一个明确的、完整的用户愿望的阐述,它是在世界商用水堆及核电厂运行经验的基础上,再加上在简单、可靠和具有更大安全裕量等方面的要求而制定的。

用户要求的范围覆盖了整个核电站的各个方面,是 21 世纪核电站设计的基础。其目标在保证新的核电站具有安全性好、性能优良、容易建造和经济性好的特点。

用户要求的第一卷是政策方针方面的要求,第二卷讨论先进型轻水堆,第三卷讨论非能动安全式反应堆。

(1)总的政策方针方面的原则要求

在政策方针方面,用户要求主要围绕着安全可靠、简单方便和经济可行等各要点而提出。

安全性要求,主要包括:

1)保证人身及设备安全(保护个人及投资安全),强调对各种事故要有周到的预防措施、有效的缓解手段。对严重事故下的安全壳性能要进行评估,以保证严重事故条件下安全壳有足够的承受能力。

2)建立安全设计基准与安全裕量,要求按执照申请设计基准(LDB)进行设计,设计应是保守的,以满足核管会的管理要求,设计应遵照安全裕量基准(SMB),用户要求中特别强调设计裕量的重要性,超过管理要求的设计裕量认为是可取的。

3)采用成熟技术,以减少风险,充分利用现有核电站的运行经验,并保证建设的新电站技术上已成熟到不需事先再建原型电站,成熟技术是指在核电站及其它工业领域(如热电站、加工工业等领域)被证明是成功的技术。

4)强调质量保证,要求设计、建造均应有严格的质量保证体系。新核电站的设计应有利于预防人为的破坏,并通过保安措施,电厂布置的紧凑性以及系统的配置和保安设计,对人为破坏提供额外的预防手段。

5)在设计过程的每一步骤中,还应考虑人因因素,尤其在主控制室的设计中应体现考虑人因因素的改进。

6)睦邻友好,减少放射性及有害物质的排放,设计应对周围环境和居民做到睦邻友好。

在简单、方便方面,主要要求包括:

1)设计与运行的简单性,用户要求认为简单性是核电站成功的基本条件,首先从运行人员的角度保证运行简单可靠。

2)可维护性,核电站的设计要易于维护,以减少操作,降低维修成本,减少职业性照射的剂量,部件要易于维修及更换。

3)可建造性,设计中必须考虑建造,建造前应有完整的工程设计、建造周期应比现有核电站大大缩短,使投资者有足够的信心。

4)标准化,形成满足用户要求的技术基准。

5)管理的稳定性,解决执照申请中的一些遗留问题,适当修改管

理要求,建立对付严重事故措施的可接受的要求,以保证核电站的执照申请能在稳定的基础上,较简便地获得允许。

在经济可行性方面,要求核电站比其它可供选择的中心电厂在整个寿期内均具有更好的经济性。

以上是用户要求的政策方针方面的主要内容,下面我们来讨论一下具体的要求。

(2)设计要求概述

1)总体设计方面

- 电站类型及容量:对于普通压水堆和沸水堆,参考容量为1350MW。

对于先进型轻水堆(APWR和ABWR),参考容量为(1200~1300)MW。

非能动型先进水堆,参考容量为600MW。对于容量方面的要求,是基于规模效应方面的考虑,并考虑了现实具有的水平。

- 安全系统方面的要求,在设计概念中要力求简单。
对于先进型轻水堆,应采用简化的,经过改进的能动式安全系统,对于非能动型轻水堆,主要采用非能动安全系统,应不需要安全级交流电源(目前普通核电站中普遍采用安全级交流电源)。
- 核电站的设计寿命,要求达到60a(目前普通核电站的设计寿命为30a到40a,主要限制条件为主要设备的耐辐照能力,为了提高设计寿命,要求限制辐照剂量和改进材料性能)。
- 设计准则方面:要求简单、可靠、加大设计裕度,采用成熟的技术(以保证安全可靠),以确信不需要建造原型电站即可直接建造商用电站。
- 核电站厂址选择方面,要做到全(美)国大多数有可能作为厂址的地区都能满足厂址选择方面的要求。
安全停堆地震加速度为0.3g(g 为重力加速度,现有核电站

通常要求的安全停堆地震加速度为 $0.2 g$ 。

2) 安全及投资保护(设备安全)方面

- 事故抑制:设计应减小初因事件的发生频率,并减小其后果的严重性,应采取的具体措施例如:
燃料元件设计的热工裕量应 $\geq 15\%$;
通过增加冷却剂装量等措施来延缓电站的瞬变响应;
采用性能最好的材料等。
- 预防堆芯损坏:设计中要阻止初因事件向堆芯损坏的方向演化。
- 堆芯损坏频率:通过风险概率分析(PRA)表明,堆芯损坏的频率要小于 10^{-5} /堆年。(目前全世界水堆的几千运行堆年中,出过两次堆芯损坏事故——三里岛电站事故和切尔诺贝利电站事故——故堆芯损坏平均概率约在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 之间。)
- 预防失水事故(LOCA):要求当发生小于 6 英寸^①直径的破口时,不会再有燃料元件损坏。(目前现有核电站的安全要求是:发生 2 英寸直径的破口时允许有少量燃料元件破损。)
- 全厂断电情况下能保证堆芯冷却的时间:对能动型的先进反应堆,最少应保证 8h 内堆芯的冷却,对于非能动型的先进轻水堆,应保证堆芯冷却方面,无时间限制。(现有核电站要求的不干预时间为 2h。)
- 操纵员干预:对于非能动型先进轻水堆而言,在设计基准事故(包括丧失冷却交流电源)条件下,在至少 72h 内无操纵员干预,也不会有参数超过堆芯保护的管理限值。
- 严重事故频率及后果方面,要求当发生频率大于 10^{-6} /堆年的严重事故时,用 PRA 分析表明,厂区周围个人累积剂量小于 0.25 Sv ,现有核电站在发生此类事故时,要求疏散厂区周围的居民。

① 1 英寸 = 2.54 厘米

- 安全壳设计方面:要求具有坚固的安全壳,能承受设计基准的破口事故下产生的压力。在三里岛事故后,安全壳的作用受到了普遍的肯定,现有核电站在一定情况下允许安全壳向外排放以保证不超压,新的用户要求显然提高了这方面的标准。
- 放射源项,与现有管理导则 TID-14844 的概念类似,但新的要求具有更加准确的释放份额,释放时间及化学组成方面的分析。
- 氢的产生:安全壳内的氢应 $<13\%$ (这对应于 75% 燃料包壳氧化所产生的氢)。
- 应急计划方面:对于非能动先进型水堆,应提供简单的厂外应急计划。

3) 电站性能方面

- 设计可利用率,达到或超过 87% 。目前已有核电站的设备利用率,据 1996 年统计,全世界平均约为 $70\% \sim 80\%$,分国家的统计表明高的大约为 80% 左右,低的只有 69% 。
- 换料周期:要求 24 个月换一次料,现有核电站多为每年(12 个月)换一次料。换料期延长,可以缩短每年的平均停堆时间,改善反应堆的设备利用率,从而改善其经济性,但对燃料元件的要求提高了,要求能承受更高的燃耗,现有核电站(水堆型)的燃耗约为 $(3 \sim 4)$ 万 $\text{MW} \cdot \text{d}/\text{t}(\text{U})$,如果换料期延至 24 个月,则通常燃耗应达 $(4 \sim 5)$ 万 $\text{MW} \cdot \text{d}/\text{t}(\text{U})$ 以上。
- 非计划的自动停堆次数。这是一个运行可靠性,也是一个经济性的指标,要求每年计划外自动停堆次数 <1 次。(现有核电站为 $(1.2 \sim 2)$ 次/年。)
- 负荷调度性能:要求作到日负荷跟踪,现有核电站主要带基本负荷,要做到日负荷跟踪必须改善其可运行性(运行灵活性)。
- 甩负荷性能:对于压水堆,要求从 100% 功率开始,甩负荷不致引起反应堆和汽轮机脱扣,对于沸水堆,要求从 40% 功率开始甩负荷,不会引起反应堆和汽轮机脱扣。(现在运行中核

电站在这种甩负荷情况下,反应堆与汽轮机脱扣是允许的。)沸水堆甩负荷时,汽轮机主汽阀关闭,反应堆回路内蒸汽压力急剧上升,使堆芯内的含汽量急剧减小,在空泡反应性系数作用下,会引入相当大的正反应性,若正反应性过大,则可能造成反应堆失控,这与压水堆通过蒸汽发生器与汽轮机耦合的情况大不相同,故对沸水堆甩负荷性能的要求与压水堆也有所不同,不要求沸水堆在高于40%的负荷下甩负荷。实际上,随着技术的发展,用快速投入旁路凝汽器的方法,已可有效克服沸水堆大功率负载下甩负荷带来的困难。因为用户要求实际上是体现对新核电站的最低要求,所以这样的提法也是合乎情理的。

- 放射性水平与废物产生量:要求与目前这方面状况最佳的核电站相当,放射性职业照射剂量低于 $100 \text{ 人} \cdot \text{rem}^{\text{①}}/\text{a}$ 。运行中的核电站目前的放射性水平都很低,离卫生方面的允许标准相距较远,即是说,远不会构成对运行人员和周围居民的伤害。所以,新用户要求提出新建核电站应达到目前这方面状况最佳的核电站的放射性水平。目前大型核电站年产放射性废物 $300 \text{ m}^3/\text{a}$,工作人员的剂量水平约为 $(300 \sim 500) \text{ 人} \cdot \text{rem}$ 。
- 厂内乏燃料湿贮存能力:厂区内能贮存10a运行产生的乏燃料再加上一炉卸料。已运行的核电站通常能在厂内贮存3a到5a的乏燃料,现在扩大到10a的乏燃料,再考虑一旦发生事故要移出堆内贮存的一炉卸料,加大的乏燃料湿贮存能力改善了核电站的贮运状况。
- 运行及维修性能方面:要求新的核电站有更好的可运行性,例如电站的响应允许运行人员有更充裕的操作时间和更大的宽容。为此,设计应保证足够大的裕度,使操纵员具有良好的工作环境,设计应保证运行简单,单个操纵员即能控制全厂(现

① $1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$