

——《能源工程技术丛书》——

海上核能 利用与展望

肖 钢 马 强 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

能源工程技术丛书

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

海上核能利用与展望

肖 钢 马 强 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

海上核能利用与展望/肖钢,马强编著. —武汉:武汉大学出版社,
2015.12

能源工程技术丛书

ISBN 978-7-307-17399-6

I. 海… II. ①肖… ②马… III. 核动力船—研究
IV. U674.921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 302874 号

责任编辑:路亚妮 孙 丽

责任校对:薛文杰

装帧设计:张希玉

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:武汉市金港彩印有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:14 字数:266 千字

版次:2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-17399-6 定价:95.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

核能是一种低碳、高效、经济的大规模能源,广泛应用于核动力航母、核动力潜艇、核动力破冰船、核动力商船和核动力发电船。海洋与核能的结合,被认为是一个国家综合实力的象征。

人类对核能的和平利用已有半个多世纪的历史。如,1954年,苏联奥布宁斯克(Obninsk)建立第一座试验核电站且并网发电,标志着核能开始成为一种新的生产力。目前全球已有31个国家使用核能,累计有441座核电站分布在地球的各个地区,核电已经进入人类的生活,给千家万户带来了能源,也为全球低碳减排和减缓温室效应做出了突出的贡献。目前,核电总装机容量达到374000MW,占到了全球电力总量的16%。其中,美国在运行的反应堆有104座,生产的电力占到美国供电量的20%。

核能在海上的应用历史同样悠久,已有50多年的运行经验。美国拥有的11艘航母全部为核动力航母,使其成为国际上的海洋强国。美国“斯特吉斯”号核电站是世界上第一个漂浮核电站,曾在20世纪60—70年代为巴拿马运河地区提供能源。俄罗斯在核动力破冰船上具有丰富的应用经验。1957年,苏联制造出第一艘核动力破冰船“列宁”号。目前,世界上首艘在役的浮动式核电站——“罗蒙诺索夫”号浮动式核电站正在圣彼得堡建造,有望在2016年为海上地区提供清洁电力。

海上核能应用具有很多优点:第一,核能的能量密度高。核能是利用反应堆中的核裂变反应产生的热能来提供发电动力。 $1\text{kg } ^{235}\text{U}$ 经过全部裂变后,释放出来的能量相当于2400~2700t标准煤,通过核能发电能大大缓解对燃料气和柴油的依赖。第二,核能发电的经济性强,核电装置寿命长,普遍在40~60年,自动化程度高,操作和维护工作量小。在长周期运行过程中,核能具有显著的经济效益。第三,核能也是一种环境友好型能源。它不排放大量烟尘、二氧化硫、二氧化碳和固体废渣,不存在碳排放的压力。第四,核能是目前技术成熟度最高的替代能源,且具有不可比拟的技术成熟度优势。

在当前错综复杂的国际形势和经济发展需求背景下,开展海上核能利用研

究具有重大的意义。

首先,海上核能可以定位于南海深水油气资源开发的需求。南海深水油气资源量广阔,而当前电力、淡水补给方式困难。南海深水油气资源是事关国家主权和国家能源安全的核心问题。2014年,我国遭受了前所未有的南海主权危机。2014年1月27日,黄岩岛受到菲律宾渔船的持续骚扰,迫使中国海警用水炮驱逐菲律宾渔船。2014年5月20日,越南渔船试图在西沙中建岛海域骚扰981钻井船,而中建岛位于我国西沙群岛最南端,具有重要战略意义。我国南海具有丰富的油气资源,面积360多万平方公里的南海,历来是我国不可分割的领土。南海油气田水深较深,达3000m,远距离输送的电力消耗巨大。南海地区最远的曾母暗沙距离陆地将近2000km,而曾母暗沙地理位置又极为重要,故加强南海远程淡水、电力、能源补给是一个现实而重要的问题。海上核可以满足大规模区域供电,并提供充足而廉价的淡水、电力和热能。海上核能技术的逐渐成熟给了人们更多的想象和期待。

其次,海上核能可以定位于稠油开发的需求。渤海湾大量稠油埋在海底,挖掘潜力巨大。渤海湾稠油占渤海油气资源总储量的68%。采用常规注水开发产能低、采收率低,对于地层原油黏度超过 $350\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的稠油,冷采开发效果不理想。在陆上普遍采用的热采技术,以往在海上无法大面积实施,主要是因为缺乏廉价的热源供给。因此,如何为稠油油田提供经济的蒸汽或热流体,是渤海湾稠油油田开发的关键因素。核能的蒸汽透平所产生的 200°C 以上高温蒸汽,可以通过与循环水换热进行稠油热采,解决稠油热采需要大量热源的问题。采用核能无疑是一项值得期待的能源利用手段!

最后,推进以核能为代表的可替代能源,实现能源结构转型是中国未来可持续发展的必然之路。随着近几年全国雾霾天气的增多,PM2.5“爆表”刺痛着每个人的心。推进清洁能源发展,走绿色、低碳、清洁发展道路是实现中国梦的重要方向。我国减排任务艰巨,核能发展空间巨大。预计到2020年,我国单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%。目前,我国核电仅占全国装机容量2%,离全球平均16%的比例仍有很大差距。为此,我国提出了到2020年,我国在役和在建核电装机规模将达8800万千瓦,从目前的不足2%提高到4%,以期改善我国能源结构,应对气候变化,并进行大气污染防治。

我国核能应用虽较美国、俄罗斯等先进国家存在一定的差距,但潜力巨大。回顾我国核能应用的辉煌历程,我国核能的海上应用要远早于陆上应用。1970年,我国第一艘核潜艇下水,标志着我国已经掌握核能应用的条件。24年之后,即1994年,我国第一座陆上民用核电机组——秦山核电站投入运营。目前,我国已有商业运行的核电机组17台,总装机容量1470万千瓦,在建核电站

机组 29 台,总装机容量 3057 万千瓦。

2011 年 3 月,日本福岛核事故的发生给核电安全系统的升级换代带来了一次重要的变革。为了核电能更好、更有序地发展,我国针对运行核电厂提出了 76 项改进项目,针对在建核电工程提出了 26 项改进项目,并且确立了采用成熟的压水堆的技术发展路线。

2015 年我国正式批准核电重启,2 月辽宁红沿河核电站 5、6 号机组核准开工,此外我国自主 3 代核电技术“华龙一号”的福建福清 5、6 号机组也将在近期获批开工。而习近平总书记在访问英国期间签订海外核电订单,更标志着“核电出海”。

近年来,国内外对海上核能应用日趋热衷,在民用领域建造了核动力商船、核动力破冰船和核动力发电船。在国外,人们对这种灵活方便的海上核电站已从怀疑、忧虑转变到产生兴趣。目前俄罗斯正在建造世界第一艘核动力发电船“罗蒙诺索夫”号以及世界最大的核动力破冰船 KL-60。未来,俄罗斯计划建造 7 座浮动式核电站,以应用于北极油气开发和远东等严寒地区的恶劣气候条件供能,并向全球推广。

本书全面、系统、深刻地讲述了国内外海上核能应用情况。全书共分 7 章,依次为海上核能利用概述,海上核动力航母,海上核动力潜艇,海上核动力破冰船,海上核动力商船,海上浮动式核电站,海上核能利用展望。

本书是一本系统地介绍海上核能应用于海上发电、海上供能等领域的专著,内容全面,案例丰富,可作为政府机构、国防部门、军队、科研院校的参考读物。最后,笔者呼吁更多的有识之士关注海上核能的应用!

本书有关彩图及扩展阅读材料可扫描书末二维码获取。

编 者

2015 年 5 月

目 录

1 海上核能利用概述	1
1.1 海上核能利用分类	1
1.2 核能利用基础知识	5
1.3 海上核动力装置堆型概述	16
2 海上核动力航母	20
2.1 概述	20
2.2 美国 CVN65“企业”号核动力航母	24
2.3 美国 CVN68“尼米兹”号核动力航母	27
2.4 美国 CVN69“艾森豪威尔”号核动力航母	32
2.5 美国 CVN70“卡尔·文森”号核动力航母	34
2.6 美国 CVN71“罗斯福”号核动力航母	36
2.7 美国 CVN72“林肯”号核动力航母	39
2.8 美国 CVN73“华盛顿”号核动力航母	40
2.9 美国 CVN74“斯坦尼斯”号核动力航母	42
2.10 美国 CVN75“杜鲁门”号核动力航母	45
2.11 美国 CVN76“里根”号核动力航母	47
2.12 美国 CVN77“布什”号核动力航母	49
2.13 美国“福特”级航空母舰	52
2.14 法国“戴高乐”号航空母舰	52
2.15 苏联“乌里扬诺夫斯克”号核动力航母	55
2.16 展望	59
3 海上核动力潜艇	62
3.1 概述	62
3.2 美国核潜艇	82
3.3 俄罗斯核潜艇	105
3.4 英国核潜艇	141
3.5 法国核潜艇	144
3.6 展望	150

4	海上核动力破冰船	153
4.1	概述	153
4.2	“列宁”号核动力破冰船	158
4.3	“北极”号核动力破冰船	160
4.4	“亚马尔”号核动力破冰船	162
4.5	“50周年胜利”号核动力破冰船	164
4.6	“泰米尔”级核动力破冰船	166
4.7	俄罗斯第三代核动力破冰船	167
4.8	展望	168
5	海上核动力商船	171
5.1	概述	171
5.2	“萨凡娜”号核动力商船	174
5.3	“奥托·哈恩”号核动力商船	177
5.4	“陆奥”号核动力商船	178
5.5	展望	180
6	海上浮动式核电站	182
6.1	俄罗斯浮动式核电站	182
6.2	美国浮动式核电站	188
6.3	法国浮动式核电站	189
6.4	展望	191
7	海上核能利用展望	192
7.1	利用海上核能,推进南海深水油气资源开发	192
7.2	利用海上核能,实现南海深水远程补给基地建设	201
7.3	利用海上核能,实现南海深水空间站建设	202
7.4	利用海上核能,加速渤海湾海上稠油开发	203
7.5	利用海上核能,展望极地科考及资源开发	207
7.6	利用海上核能,促进低碳减排,推进结构转型	209
7.7	利用海上核能,彰显海上军民舰船“核”心实力	210
	参考文献	213

1 海上核能利用概述

核能是一种低碳、高效、经济的大规模能源,50 多年来广泛应用于核动力航母、核动力潜艇、核动力破冰船、核动力商船和核动力发电船。海洋与核能的结合,被认为是一个国家综合实力的象征。在当前错综复杂的国际形势和经济发展需求背景下,开展海上核能利用具有重大意义。

1.1 海上核能利用分类

海上核能利用一般可以分为三大领域,即提供动力、提供电力、提供热能。

1.1.1 提供动力

海上核能提供动力主要体现在核动力航空母舰、核动力潜艇、核动力破冰船、核动力商船这四个方面,如图 1-1 所示。

(1)核动力航空母舰

美国拥有世界上最多和最大的航空母舰,并拥有“企业”级、“尼米兹”级大型核航母,是当今世界上航母力量最强大的国家,其核航母技术仍处于世界领先地位。

早在 20 世纪 50 年代,美国海军认识到核动力的优越性后,即决定研制核动力航母。1961 年 11 月,世界上第一艘核动力航母——美国的“企业”号建成服役。“企业”号航母上装备核动力装置,使航空母舰具有更大的机动性和惊人的续航力,更换一次核燃料可连续航行 10 年。而且,它可以高速地驶往世界上任何一个海域。“企业”号核动力航母的问世使航空母舰的发展进入新纪元。

美国在“企业”号核动力航空母舰的基础上又发展了“尼米兹”级核动力航空母舰,这是继“企业”号核动力航母之后美国第二代核动力航空母舰。其首制舰是“尼米兹”号,于 1975 年 5 月建成服役。其标准排水量为 72916t,舰长 332.9m,宽 40.8m,舰上装有 2 座核反应堆和 4 台蒸汽轮机,航速 30 节以上,装填一次核燃料可持续使用 13 年,航程可达到 100 万海里。舰上可搭载 90 架各

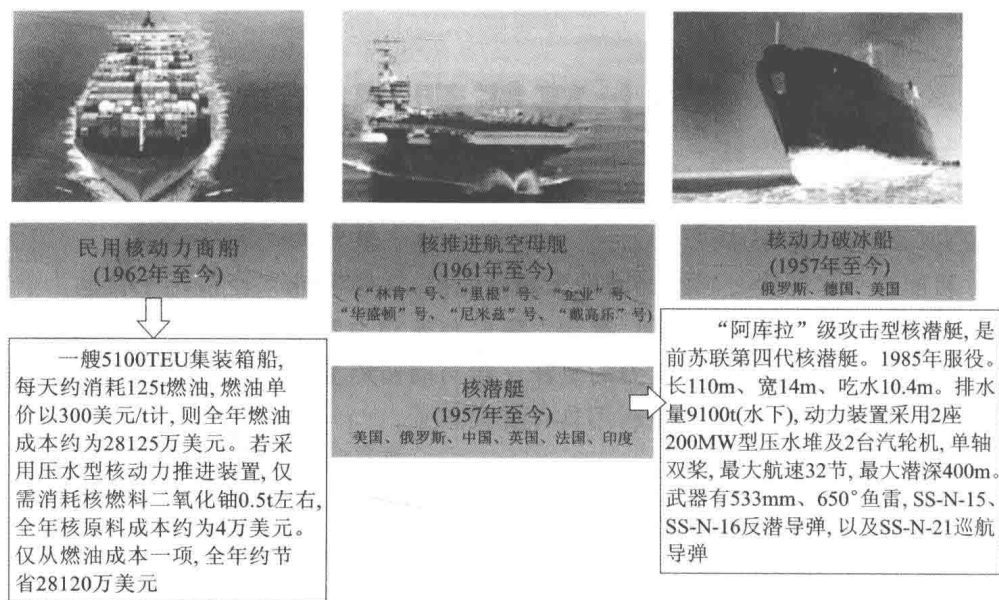


图 1-1 海上核能利用

种类型战机, 最大舰载机数量超过 100 架。“尼米兹”级是美国海军大型核动力航空母舰, 舷号自 CVN68 至 CVN77, 共计建造 10 艘。从 20 世纪 60 年代开始设计建造, 直到 21 世纪初, “尼米兹”级一直是美国海上力量和全球战略的支柱。“福特级”核动力航空母舰是由“尼米兹”级核动力航空母舰发展起来的, 是代表美国最新水平的核动力航空母舰。

(2) 核动力潜艇

目前, 全世界公开宣称拥有核潜艇的国家有 6 个, 分别为: 美国、俄罗斯、英国、法国、中国、印度。其中美国和俄罗斯拥有核潜艇最多。世界上第一艘核潜艇是美国的“鹦鹉螺”号, 它宣告了核动力潜艇的诞生, 1954 年 1 月 24 日首次开始试航。核潜艇的出现和核战略导弹的运用, 使潜艇发展进入一个新阶段。由核潜艇装载的远程导弹射程为 3000~8000km, 洲际导弹射程在 8000km 以上, 因此, 装有核战略导弹的核潜艇成为海洋强国具备海上威慑力的必备基础。

(3) 核动力破冰船

破冰船是用于极地地区破碎水面冰层, 开辟航道, 保障舰船进出冰封港口、锚地, 或引导舰船在冰区航行的勤务船, 分为江河、湖泊、港湾或海洋破冰船。船身短而宽, 长宽比值小, 底部艏艉上翘, 艏柱尖削前倾, 总体强度高, 艏艉和水线区用厚钢板和密骨架加强。推进系统多采用双轴和双轴以上多螺旋桨装置, 以柴油机为原动力的动力推进。螺旋桨和舵有防护和加强作用。破冰时, 艏部

压挤冰层,在行进中连续破冰或反复突进破冰。俄罗斯拥有 7~8 艘核动力极地破冰船,可执行任务的约有 6 艘。

1957 年,苏联制造出第一艘核动力破冰船——“列宁”号。它的动力心脏是压水式核反应堆,高压蒸汽推动汽轮机,带动螺旋桨推动航船。如果核动力破冰船带上 10kg 铀,就相当于带上 25000t 标准煤,可以在远离港口的冰封海域里常年作业。破冰船装有 2~4 只螺旋桨。

破薄冰的船在船艏和靠近船头的侧位分别装两只螺旋桨,船头螺旋桨从冰下将水抽出,削弱冰层的支托并使其成片状裂开,船在后两只螺旋桨的推动下前进。破厚冰的船,为使船可以冲到冰层上面,多在船艏两侧对称地装两只螺旋桨。由于很多海域在冬季都会出现结冰现象,所以很多国家都有破冰船,一些靠近北极的国家还拥有专门的北极破冰船。

1.1.2 提供电力

海上核能提供电力主要体现在核动力发电船方面。这是目前国际上最新的应用趋势,即将海上核动力驱动转变为海上核动力发电。核装置没有变化,只是马达变成了发电机。

(1) 美国海上核电站

1982 年 12 月,美国原子核协调委员会批准美国建造海上核电站的计划,并同意设计用于电站的核反应堆。美国西屋电气公司负责设计这种漂浮在海上的核电站。它是在一个长 130m、宽 120m、深 12m 的铁制浮动箱上建造的小型核反应堆。浮动箱露出水面 3m,而有 9m 处于水下。整个核电站重约 16 万吨,可以在深 15m 的浅海中漂浮。

海上核电站设计了一种环形式的防波堤。这种防波堤建造得非常坚固,是用 1.7 万多个星状钢筋混凝土堆桩垒成的,而且在堤的下面还有多个长 60m 的混凝土沉箱作为地基支承着。在堤上还建有水闸,以便海水进入核电站周围,作为反应堆工作时的冷却用水。

(2) 俄罗斯海上核电站

俄罗斯正在建设全球首座浮动式海上核电站。根据俄联邦原子能署计划,浮动核电站将建在一艘长 144m、宽 30m 的驳船上,将装载 2 座 35MW 的 KLT-40S 反应堆。

俄罗斯国家原子能公司(Rosenergoatom)已经与巴尔迪斯基造船厂签署了完成第一座浮动式核电站的合同,核电站预定在 2016 年试运行。这座名为“罗蒙诺索夫”号的浮动核电站将在俄罗斯远东堪察加地区的威尔尤欣斯基投入使用。第一座浮动核电站船体的龙骨曾于 2007 年 4 月在北方造船厂(Sevmash)

铺设。但是,2008年俄罗斯国家原子能公司表示其建造被转至巴尔迪斯基造船厂,因为北方造船厂已经承接过多的军工合同。俄罗斯国家原子能公司与巴尔迪斯基造船厂在2009年2月签署了一份完成核电站的合同,当时预计船体将于2012年完工,但是后来由于巴尔迪斯基造船厂自身面临破产的境地导致工作受阻,目前计划推迟至2016年完成。

“罗蒙诺索夫”号浮动式核电站作用突出,能为20万人口的城市提供足够的电力,其运行寿命约为38年,包括3个为期12年的运行周期,每个周期中间平均停产8个月。海上核电站投入使用后将使用纯度在20%以下的浓缩铀。船上有储存核废料的设施,每10~12年进行一次彻底检修,并清理储存的核废料。

这种新型浮动核电站能够适应北极和远东等严寒地区的恶劣气候条件,俄罗斯共计划建造7座类似核电站。目前,俄罗斯已与多个国家开展了浮动核电站合作交流。

1.1.3 提供热能

核能的热量还可以用于造淡、脱盐等方面。我国淡水资源短缺,目前全国2/3的城市有不同程度的缺水,1/6的城市严重缺水,主要沿海城市有一半以上的城市缺水。截至2011年年底,我国海水淡化能力仅为66万立方米/日。根据我国《海水利用专项规划》及政府部门《关于加快发展海水淡化产业的意见》,海水淡化产业得到了快速发展。

从市场需求来看,未来核能海水淡化具有广阔的发展空间,其在技术上不存在大的困难。鉴于核能节能环保的特征,核能供热在居民采暖、空调制冷、工业供气等方面也具有较好的发展空间。为充分利用核能的清洁和环保优势,应重点在一次能源短缺、能源输送通道匮乏的地区布局核能供热项目。重点考虑热网面积大、热负荷落实且集中的大型工业园区负荷,供热负荷的稳定和集中有利于核反应堆的安全稳定运行和提高负荷因子。

为了利用核能进行海水淡化,解决世界上淡水日益缺乏的问题,法国设计了一个小功率的核反应堆用于海水淡化,计划每天可产淡水8万吨,足够15万人使用。美国为了解决南极考察站的需要,也设计了一个日产淡水53t的核反应堆。摩洛哥也在设计一座1万千瓦的核能淡化海水工厂。因此,有望利用核能来为一些缺淡水的沙漠地带和海岛提供淡化的海水,为人类开辟更多的生存与开发条件。

1.2 核能利用基础知识

1.2.1 核能发电原理

核能实际上是指原子核能,即原子核结构发生变化时释放出的能量,通常指重核裂变或轻核聚变时所释放的能量。当中子撞击 ^{235}U 时, ^{235}U 分裂成两个或三个较轻的原子核,发生质量变能量的转换,产生 $2\sim 3$ 个中子和 β 、 γ 射线,释放出约 200MWe 的巨大能量,核裂变反应产生的新中子再引起第二代核裂变反应,如此形成核裂变反应链,称为链式核裂变反应。

核电站利用核反应堆所产生的热能来发电。核电站大体可分为两部分:一部分是利用核能产生蒸汽的核岛,包括反应堆装置和一回路系统;另一部分是利用蒸汽发电的常规岛,包括汽轮发电机系统。反应堆是核电站的关键设备,相当于热电厂的燃烧炉。但与热电厂不同的是,核电站的燃料是铀或钚,而不是煤和天然气等化石燃料。用铀制成的核燃料在反应堆内“燃烧”,即发生核裂变反应,产生大量热能并推动发电机旋转,电就源源不断地产生出来,并通过电网送到四面八方。目前核电站常用的核反应堆有压水堆、气冷堆、沸水堆、重水堆及快堆等,其中应用最广泛的是压水堆。压水堆核电站的原理示意图如图1-2所示。

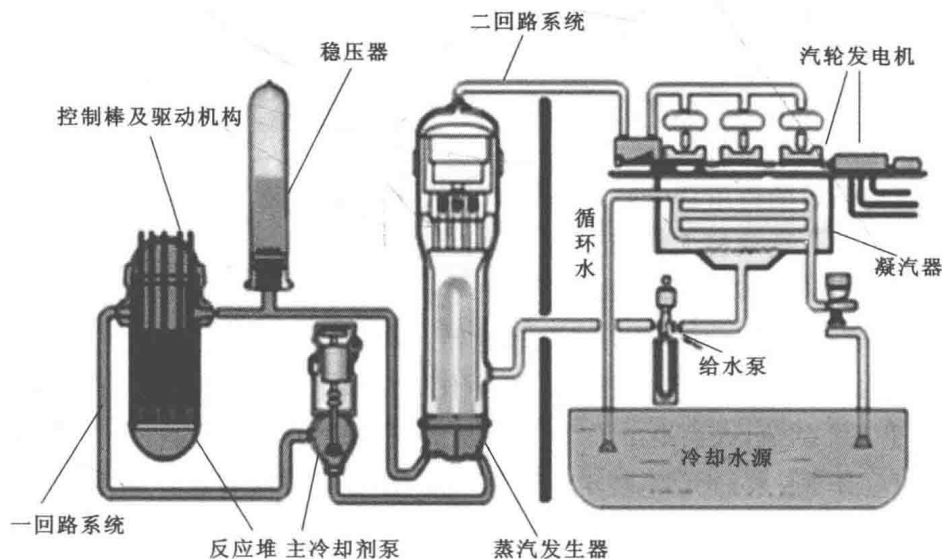


图 1-2 大型压水堆核电站示意图

一回路系统由反应堆、冷却泵、蒸汽发生器、加压器及相应的管道和阀门等组成。回路中的冷却剂将裂变能转变的热量带出堆外并在蒸汽发生器中将热量传给二回路工质。放出热量后的冷却水温度降低,由冷却泵重新返回反应堆,构成一个闭合的循环回路。一般压水堆动力装置的一回路系统有2条并联的环路,每条环路均由一台冷却泵和一台蒸汽发生器通过主管道与核反应堆相连接。由一台共用的加压器来调节控制回路的压力。整个一回路循环系统的主要设备均集中安装在密封的安全壳体内。船用反应堆安全壳是钢制密闭壳,能承受一定的压力,可以防止放射物质向外扩散,保护艇员及海洋环境。

二回路循环系统由汽轮机、发电机、冷凝器、凝结水泵、给水泵、给水加热器和中间加热汽水分离器等设备组成。二回路的工质也是水,从冷凝器凝结下来的水经过除氧、加热后通过给水泵送到蒸汽发生器里,水在蒸汽发生器中被加热汽化产生蒸汽,经过汽水分离器,提高蒸汽干度,再通过主蒸汽管送向汽轮机,推动汽轮机叶片转动做功。做功后的废汽在冷凝器内再冷却成凝结水,如此构成第二个闭合循环回路。主汽轮机直接通过齿轮减速箱推动螺旋桨,辅助汽轮机带动发电机发电,供舰船中控制仪器、仪表和辅助装置工作,同时供舰船上生活和照明等用电。

1.2.2 小型堆概述

小型核电也叫小型反应堆,简单理解就是功率小的核电站。按照国际原子能机构(IAEA)的定义,小型反应堆指电功率小于30万千瓦的反应堆,中型反应堆指电功率为30万~70万千瓦的反应堆,大型反应堆指电功率大于70万千瓦的反应堆。

现有新建的商用核电站几乎都属于大型核电站装机容量基本上都是百万千瓦以上。这就使人们形成一个印象,核电站都是大型的。其实不然,核电站在发展初期,都是小型的。世界上第一座核电站是前苏联的奥布宁斯克核电站,装机容量只有0.5万千瓦。世界上第一座商用核电站是美国的希平港核电站,装机容量为9万千瓦。第一代商用核电站装机容量都在30万~50万千瓦。随后,人们提出了“规模经济效应”,认为核电站造得越大,经济效益越好。于是,人们开始想方设法提高核电站的装机容量。到了20世纪60年代中期,人们已经开始建造80万千瓦级的核电站,而在80万千瓦级核电站还没建成时,就已经有百万千瓦级的核电站开建了。而到现在,美国第三代核电站AP1000的装机容量是125万千瓦,正在我国浙江台州市三门县

开建;欧洲第三代核电站 EPR 的装机容量达到了 175 万千瓦,正在我国广东台山市开建。

美国能源部(DOE)在 IAEA 小型堆概念的基础上加入了模块式概念,称为 Small Modular Reactors(SMR)。目前小型堆的堆型有压水堆、高温气冷堆、沸水堆、液态金属快堆、熔盐堆等各种堆型。其中,小型压水堆是国际上的主要研究方向。小型堆如图 1-3 所示。

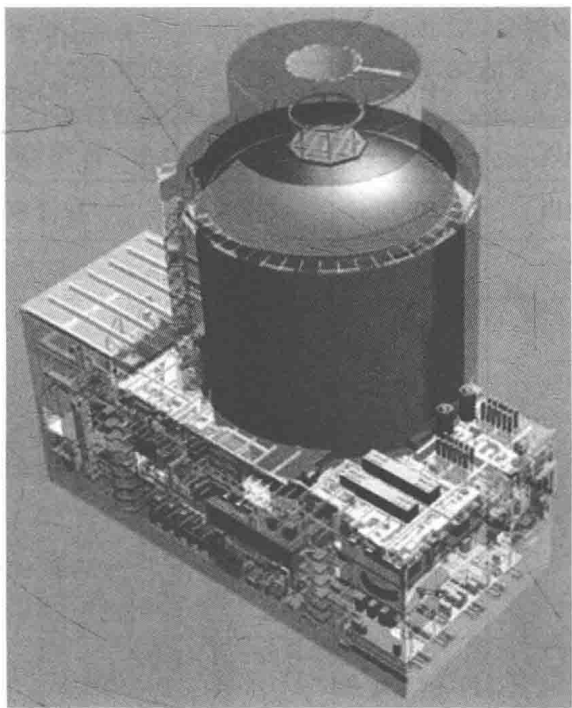


图 1-3 小型堆示意图

目前多个国家正在开发各种新型小型堆,国外包括美国西屋公司的 IRIS、W-SMR,巴威公司的 mPower 设计, NuScale Power 公司的 NuScale 设计, Holtec 公司的 SMR-160,韩国的 SMART,俄罗斯 OKBM 的浮动式 KLT-40S,法国国有船舶公司的 FLEXBLUE;我国有中国广核集团有限公司的 ACPR 系列小型堆,中国核工业集团公司的 ACP100,清华大学的供热用低温堆。除上述压水堆堆型之外,高温气冷堆堆型也处于不断发展完善之中,如日本的 30MW_{th} (MW_{th} , 功率单位, Megawatt Thermal) 的高温工程实验堆 (HTTR) 和中国的 10MW_{th} 高温气冷实验堆 (HTR-10), 华能集团模块式高温气冷堆示范工程 HTR-PM 目前已经开工建设。全球小型堆研发现状如表 1-1 所示。

表 1-1 全球小型堆研发现状

堆芯	国家	堆型	电力输出/ MWe	装置配置
KLT-40S	俄罗斯	PWR	2×35	双机组船舶安装装置
VBER-300	哈萨克斯坦、 俄罗斯	PWR	302	单模块或双机组陆基或 船舶安装装置
ABV	俄罗斯	PWR	2×7.9	双机组船舶安装或陆基装置
CAREM-25	阿根廷	PWR	27	单模块陆基装置
SMART	韩国	PWR	90	单模块陆基装置
NuScale	美国	PWR	12×45	12 个模块陆基装置
mPower	美国	PWR	180	多模块陆基装置
西屋 SMR	美国	PWR	>225	—
ACP100	中国	PWR	100	双模块陆基装置
HTR-PM	中国	HTGR	2×105	2 个模块陆基装置
AHWR	印度	先进重水堆	300	单模块陆基装置
SVBR-100	俄罗斯	Pb-Bi 冷快堆	101.5	单模块或多模块陆基或 船舶安装装置
新海波龙 核电模块	美国	Pb-Bi 冷快堆	—25	单模块或多模块陆基装置
4S	日本	Na 冷快堆	10	单模块陆基装置

一般而言,单堆功率越大,其单位投资成本越低,从而发电成本越低。但是单堆功率越小也有优势,其在实际应用中更加灵活。

(1)压水堆

在现有的小型堆设计中,最常用的技术是压水堆。这主要是因为数十年安全运行压水堆的经验,使得这种反应堆在安全性能方面更有保障。

多个国家正在开发各种新型 SMR,其中许多是压水堆。美国正在研制的小型堆有美国西屋电气公司的 W-SMR、巴威公司的 mPower 设计、NuScale Power 公司的 NuScale 设计、霍尔台克公司的 HI-SMUR140 设计。

NuScale 单个模块的发电功率为 45MWe, 换料周期为 2 年, 设计寿命为 60 年。采用一体化反应堆模块技术, 蒸汽发生器、堆芯、稳压器布置在压力容器内, 压力容器位于反应堆安全壳内。每个 NuScale 模块都具备自身的安全壳与反应堆系统, 以及特定的汽轮发电机组。在设计方面, NuScale 具备多种创新性的设计。NuScale 的核蒸汽供应系统采用籽冷循环冷却设计, 集成了反应堆堆芯和蒸汽发生器的管束, 无须主泵, 并且其主冷却剂的循环完全依靠自然循环, 从而完全消除了主泵与外部应急电源的使用。此外, 非能动余热排出系统紧凑地布置于钢制安全壳内。NuScale 小型堆一体化设计和自然循环设计可以消除大破口失水事故和主泵故障。此外, NuScale 采用非能动安全设计, 事故条件下无须电源支持即可通过自然循环排出堆芯余热。NuScale 的换料周期为 2 年, 每次更换 13 个燃料组件, 换料时间不超过 10 天。NuScale 反应堆如图 1-4 所示。

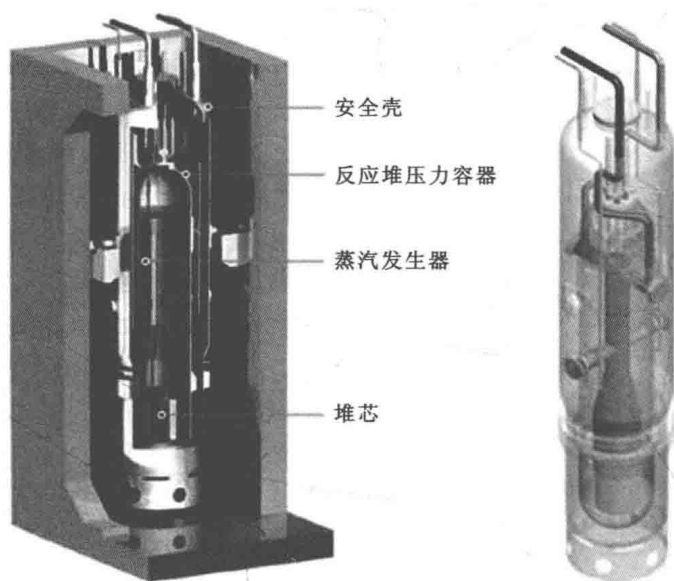


图 1-4 美国 NuScale 小型堆

mPower 小型堆电功率为 180MW, 换料周期为 4 年, 设计寿命为 60 年。其为一体化的压水堆, 堆芯、蒸汽发生器、稳压器均布置在反应堆压力容器内, 控制棒驱动机构和主泵也置于压力容器内。冷却剂在堆芯加热后, 通过蒸汽发生器提升段由主泵向上流动, 并在蒸汽发生器冷却后向下流回堆芯。二回路水在蒸汽发生器的管外流动并加热。核电厂采用整理换料技术, 可以减少换料造成的停堆时间。mPower 采用非能动专设安全系统, 可以在无操纵员的干预下至少提供 72 小时的堆芯冷却保护。mPower 小型堆如图 1-5 所示。