

# 世界核电延寿及退役市场初步研究

王欣,王苏礼<sup>①</sup>

(国核(北京)科学技术研究院有限公司,北京 102209)

**[摘要]** 退役是核电站全寿命周期中的一项必不可少的环节。随着全球越来越多在运核电站的运行寿命到达其设计年限,电站的退役及延寿问题越来越受到国际原子能机构以及世界各国的重视。文章梳理了世界核电现状、世界核电运行寿命管理以及核电退役的世界性难题,并对 35 个核电国的核电机组的退役及延寿市场进行分析,总结出 2015 年以后的世界核电机组退役市场情况。结果表明,2030 年左右将迎来世界机组退役的高峰时段。因此,随着世界各国核电退役市场的不断扩大,我国应从现在起抓紧核电站退役技术、乏燃料后处理技术的研发,以保证后期顺利进入核电退役市场。

**[关键词]** 核电站寿命管理; 设计寿命; 退役; 延寿

**[中图分类号]** F416.61 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-0755(2015)02-0006-06

## 一 世界核电概述

### (一)世界核电站现状

2011 年的福岛核事故导致全球核电产业陷入低迷,在经历了 3 年多的核电低潮期后,世界核电的发展呈现复苏趋势。如今,核能作为一种清洁高效的能源,仍然是众多国家保障能源安全、提供基荷电

源和应对气候变化的一个重要选择。

截止到 2014 年 4 月,全球在运核电机组共 435 台,遍布于 35 个国家,总装机容量为 372812MW。核电站主要分布在北美、欧洲及东亚的一些工业化国家,机组数量名列前茅的依次是美国、法国、日本、俄罗斯、韩国、印度和中国<sup>[1]</sup>(如图 1)。

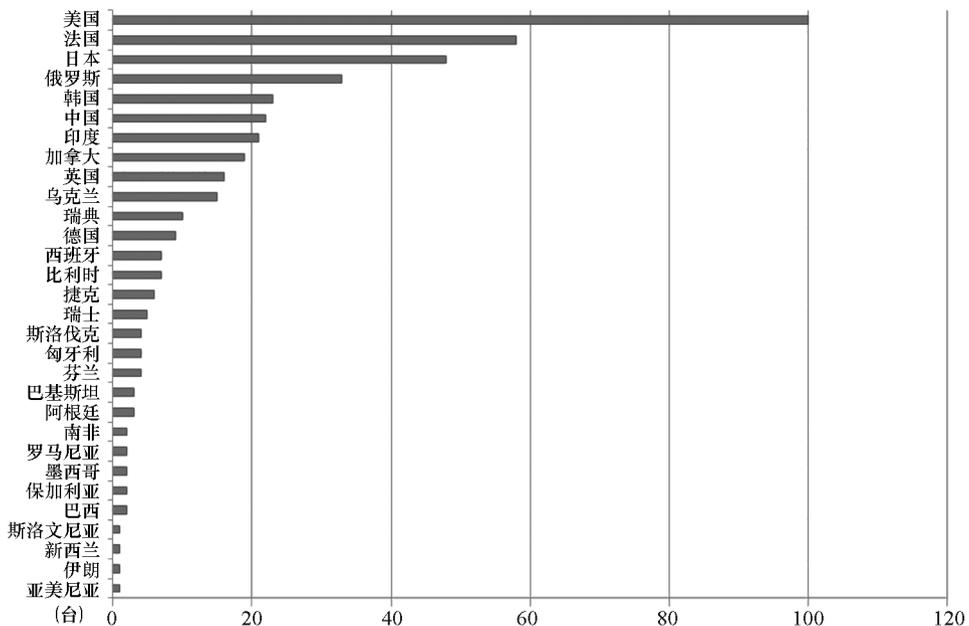


图 1 全球机组数量及分布

按照核电发电量占全国发电量比重来考察,核电发电量占全国发电量超过 40% 的国家依次为法

**[收稿日期]** 2015-02-05

**[作者简介]** 王欣(1988-),女,河北怀安人,国核(北京)科学技术研究院有限公司研究员,初级工程师。

<sup>①</sup> 国核(北京)科学技术研究院有限公司研究员,高级经济师。

国、斯洛伐克、比利时、乌克兰和瑞典。法国位居第一,其发电量占全国发电量的 78% (如图 2)。

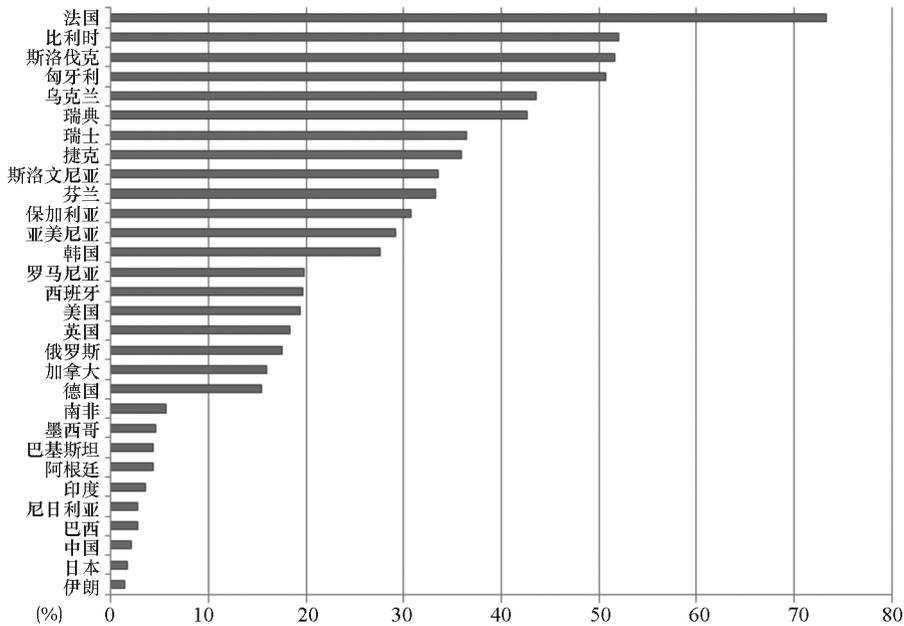


图 2 各国核电发电量占全部发电量比

## (二) 世界核电机组服役情况

世界上其他主要核电国家的机组大部分集中建设于 20 世纪七八十年代,主要堆型为二代压水堆和沸水堆。全球在运核电站的服役时间集中在 27 ~ 31 年<sup>[2]</sup>,该年龄段的机组数量占全部机组数量的 25%,其中服役 30 年的机组最多。按照核电站设计

运行寿命为 40 年计算,七十至八十年代兴建的大批核电站已经运行超过 30 年<sup>[3]</sup>(如图 3),大部分核电机组的服役年龄将接近或已经达到设计寿命。因此,从 2020 年起,有一大批核电站将面临两种选择:退役或延寿。核电站退役后妥善的处理方法和延寿管理也将成为各核电国所必须重视的问题。

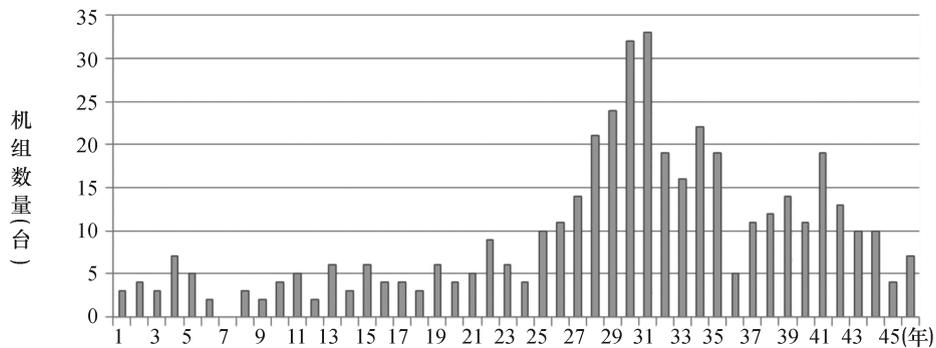


图 3 在运机组服役时间

核电站运行寿命主要由核电站内不可更换设备的寿命所决定,即压力容器、安全壳等。这些设备会在核电站运行过程中老化,从而决定了整座核电站的服务期限。20 世纪六七十年代,设计人员对核电站的设计寿命采取保守的态度,通常设定为 40 年,保留一定的安全裕度。随着研究人员在实践中进一步掌握了不可更换设备在运行中的老化情况,人们逐渐意识到核电站实际寿命要高于设计寿命。同时考虑到核电站寿命延长可以降低成本,提高经济效益,因此延寿问题越来越受到国际原子能机构以及

世界核电国家的重视。

## (三) 世界各国对核电的态度

国际原子能机构已经对核电站延寿问题进行了 10 多年的研究,希望能够将目前全球在运核电站的寿命从 40 年延长到 60 年。福岛核事故后,大多数核电国家迅速做出反应,对所有核电机组进行全面的安全检查。此外,很多国家重新审视了自己的长期能源发展计划和政策,其中部分国家决定在未来两个 10 年中对核电采取逐步淘汰策略。德国在福岛核事故发生后,声明取消在 2010 年 9 月发布的对

核电机组平均延寿 12 年的决定,关闭了需要补给燃料和维修的 8 台机组,并加速对 9 台机组 2022 年前的逐步淘汰;比利时和瑞士在福岛核事故后也提出了核电逐步淘汰策略<sup>[1]</sup>(表 1)。

表 1 福岛核事故后的核电政策回应

国家	核电政策
美国、法国、俄罗斯、 韩国、英国、印度、加拿大、 芬兰、匈牙利、阿根廷、 巴西、保加利亚、亚美尼亚、荷兰	支持核电继续发展,对国内所有核电站进行安全状况检查
比利时、德国、瑞士、瑞典	逐步淘汰核电站—不再新建核电站
日本	在建核电站延期,福岛 1-4 号机组退役,剩余 50 台机组在 2012 年 5 月前关闭。2012 年 6 月 2 台机组重启。未来的核能利用颇具争议,随后,宣布在 21 世纪 30 年代末逐步淘汰核电的意向。
中国	新的核电站建设执照颁发放缓,但在 2012 年 10 月后又重新颁发
白俄罗斯、土耳其、阿拉伯	订购第一台机组
智利、印尼、马来西亚、 泰国、摩洛哥、沙特阿拉伯	核电政策延迟或没有最终的政策回应
孟加拉共和国、越南、埃及、 约旦、尼日利亚、波兰	继续准备政策框架
意大利、科威特、 塞内加尔、委内瑞拉	引进核能计划取消

福岛核事故已过去四年时间,一些国家对核电的态度又有了新的改变。世界拥有核电站的国家和地区,特别是一些较早建造需要核电站的国家,经过认真的研究和考虑,基本对核电站延寿持有三种态度。第一种态度是积极和支持的,并已行动或即将行动,如美国、英国、法国、日本、俄国等,这些国家认为对延长核电站运行寿期的前景会愈来愈清楚,指出这一措施是全球核电站发展的必然趋势;第二种是抱以观望态度并正在进一步考虑是否延寿,如西班牙、瑞典、墨西哥、乌克兰、匈牙利等国;第三种是考虑核电站延寿问题,如巴基斯坦、罗马尼亚、阿根廷等国;斯洛文尼亚、立陶宛、巴西等国家则明确声称不打算安排这方面计划。

## 二 核电站的运行寿命管理

目前,全球核电站长期运行管理方式主要有两种。第一种是运营执照更新的管理方式,即当初定下的期限(一般 40 年),是基于经济还贷等方面的考虑,并不是基于技术方面考虑,如果核电站需要延寿,必须由执照更新来实现。执照更新主要关注对电站整体性评估、限时老化分析以及最终安全分析

报告升级三个方面。第二种即定期安全审查(PSR)方式的寿命管理,采用这种方式管理的核电厂需要通过每十年一次的安全审查来确保核电站的安全性,只要通过定期安全审查,那么就可以每十年一个循环继续运营下去。PSR 主要从技术、安全管理、组织及安全文化进行评估,另外还增加了根据当前标准对电站安全状态进行评估、限时性老化分析等。

美国采取的是执照更新的运营管理方式,美国执照更新的先决条件是要符合维护要求和其他确定的管理流程,充分解决能动构件和系统的老化管理问题。根据 NRC 现有执照批准规则的管理监督功能确定是否满足这一先决条件。现有执照批准规则包括:根据维护准则管理监督;遵照现有技术操作说明书管理监督;最终安全分析报告更新规则管理监督,以确保对能动系统功能的连续性能监测。

大多数欧洲国家和亚洲国家都采用 IAEA 的安全审查管理方式,定期对电厂持续或长期运行进行审查,并对核电厂安全性能进行定期跟踪。以我国秦山核电站为例,该核电站于 2003 年按照国家核安全局的要求完成了首次 PSR 审查,其中发现了许多 PSR 审查弱项,其中主要的老化管理相关的弱项是需建立规范的老化管理大纲,开展系统的老化管理。为满足 PSR 老化管理弱项整改要求,秦山核电厂在第二个运行十年期间,按计划逐步开展了老化管理的项目,已完成的老化管理弱项整改工作和专项老化评估项目如下:完成秦山核电厂老化管理大纲的编制、完成重要 SSCs 老化管理的筛选、压力容器的老化状态评估和寿命预估、蒸汽发生器(SG)的老化状态评估和寿命预估、稳压器波动管的老化状态评估和寿命预估。

除上述两种主要管理方式之外,一些国家采用了这两种方式的混合模式。以西班牙为例,由于西班牙对于核电厂运行寿命在法律和管理上没有限制,因此电厂没有固定的运行期限,其运行执照要经过现时评价和定期安全审查来定期更新。定期安全审查对电厂安全性进行整体审查(包括遵照有效标准对这类安全因素进行分析、电厂具体运行经历和产业界电厂运行经历分析、安全审查更新和改进程序。定期安全审查也作为管理机构确定新的运行执照许可期(一般 10 年)增加条件的主要工具,这也是西班牙所有核电厂执照更新的基础。

有些国家没有专门的核电厂寿命规程,比如加拿大,不论在原子能控制法案还是原子能控制规程中都没有专门的执照期限或更新规定,而是在加拿大原子能管理委员会(AECB)的判断下决策。

### 三 核电站退役

#### (一)世界各国核电厂退役的主要方式

目前,国际上采用的退役方法有三种,即立即拆除、安全封存(延缓拆除)和掩埋处理。从国际上已退役的核电站看,大多数核电站都采用了拆除方案。这种方案又分为三个阶段,第一阶段为监护封存期,这一阶段乏燃料元件从堆芯取出,在场内放置一段时间,等待放射性衰变,然后运出场外进行处置。第二阶段为局部拆除期或厂址限制性使用。在这一阶段,第一道污染的屏障被减小到最小尺度,拆除污染屏障内易于解体的部件,场内非放射性建筑物可以拆除或用于其他目的。第三阶段为恢复建设前的自然面貌或厂址可无限制利用。这一阶段将拆除所有放射性的材料、设备与部件,保留下来的设备部件的污染已被减小到可接受的水平,厂址可无限制使用或恢复成绿化带,无需再监测。

#### (二)核电退役面临的问题

##### 1、核废料储存

核电站退役一般会产生放射性为高中低的三种废物,低放射性废物较容易处理,由于它的放射性级别和同位素的半衰期比较小,一般采用隔离、存储的方式即可处理;中放废物在固化后进行近地面处理,铀、钚和高放射性元素裂变过程中产生的高放射性废物,其放射性同位素具有超强的辐射和极长的半衰期,有的超过几万年,一般采用深层地质隔离和后处理的方式进行处理。

高放乏燃料处置场所建设一直是世界性难题。由于很多核电站都将运行中产生的乏燃料暂时储存在核电站的水池中,直到核电站关停,导致历年所产生的乏燃料都未被处理。国际能源署表示,到2040年,全球核废料将比现在增加一倍,达到逾70万吨。面对核废料的不断增多,大多数国家都缺乏一个固定集中的乏燃料处置地点。全世界已经确定建设高放射核废料处置场厂址的国家只有芬兰,连一度被美国核电界寄予厚望的美国尤卡山核废料处置库的工程也于2010年正式终止。这意味着,世界上大多数的高放乏燃料还在库中暂时存放,以期待更安全、更能被接受的处理技术和方案出现,再做最终处理。

##### 2、退役与废料管理成本

不同反应堆在停运以后,由于堆型和选址等差异,其后续清理所耗费的时间具有不确定性,且不同机组的废物处理方案不同,因此造成巨额退役资金。在退役总成本中,核设施的处理和乏燃料管理成本占比较大。根据美国能源部报告,在尤卡山建造一座核废料存储仓库并运行100年,需要花费900亿

美元的资金。另有观点认为,乏燃料对环境的危害有可能长达上万年,需要的后处理费用将更高。2012年,英国奥尔德伯里的一座核电站退役,工作量巨大,且总面积70万平方米的核电站清理总成本预计9.54亿英镑。瑞士核电站退役成本也在增长,瑞士5台在运机组的退役费用约为32.91亿美元,而放射性废物管理在退役总费用中也占很大比例,预计为173.3亿美元。

国际能源署的数据显示,到2030年,全球核电退役成本将超过1000亿美元,且各国政府可能会低估这一成本。由于各国在安全拆除核电站方面的经验有限,这些核电站的退役成本有很大不确定性。因此,核电站退役是一个非常值得关注的问题,虽然我国目前核电机组距离退役尚有时日,但是核电站退役是一个大工程,从国外的实践经验来看,经常出现退役资金不足的状况,国内也应为核电退役所需经费积极做好预备工作。

### 四 世界核电退役市场规模展望

总结各个核电国的情况可知,绝大多数国家对核能的发展持有支持的态度,且大都想通过延寿的方法来继续运营核电站。截止到2014年4月,美国NRC已延长了73个反应堆的运营执照,并将考虑更新未来18个机组的运营执照,因此,美国将对约100台在运机组进行延寿处理。但由于每个国家的核电机组的寿命管理策略差异,一些国家采取机组进行定期安全审查的寿命管理方式,因此无法获得各国每台在运机组的准确延寿情况及延寿年限,因为全球延寿的核电机组数量较难确定,故在此不做详细分析。

世界各国在运核电机组的设计寿命通常为30~40年,截止到2014年4月,全球永久关停的核电机组数量为144台,这些机组将面临退役处理。通过对各国核电现有政策态度的分析,预测各国核电机组的运行寿命情况得出,世界在运机组将在2030年左右达到退役的高峰期。

到2030年,全球预计将有约200台现役核电机组关闭,约占全球现役核电机组的一半,退役市场规模预计超过1000亿美元。其中,欧洲预计将有131台现役机组关闭,占全球退役机组数量的63%,届时欧洲的核电退役市场规模估计将达到814.84亿元。其次是南亚、中东与远东地区(主要是日本),然后是北美地区(主要是美国和加拿大),非洲地区退役市场在2030年前很小。2030—2040年间,北美将成为退役市场规模最大的地区,主要是因为美

国有大批延寿 20 年的核电机组将达到寿期,其核电机组退役达到高峰,其次退役市场规模较大的国家为法国和日本。

对各个核电国家的现役机组分析可知,2015—2020 年,现役机组的退役数量排前三的国家分别为俄罗斯、加拿大和日本,分别达到 14 台、9 台和 5 台;2021—2030 年段,退役机组总数达到峰值,全球退役机组数量达到 141 台,其中,法国、日本、俄罗斯和英国退役机组数量名列前茅,预计分别达到 41 台、16 台、11 台和 11 台;2031—2040 年段,退役机组数量略有下降,全球预计将达到 131 台,美国、日本和法国的退役机组数量将远远高于其他国家,分别达到 47 台、22 台和 16 台,其他国家均在 10 台以下,其中美国核电退役机组达到该国峰值;2040 年后,全球现役机组的退役数量预计约为 112 台,中国、印度这些于 20 世纪 90 年代大规模建设的核电机组将在此时间段内面临退役,美国仍有大量延寿机组面临退役,因此,在此时间段内,美国、中国和印度的退役机组数量将名列前茅,其中,中国、印度的退役机组数量也将达到本国的峰值。

图 4 显示了全球现役机组在 2015 年以后的退役市场整体情况。分析该图可知,2021—2030 年间是世界现役核电机组退役的高峰时段,此时间段的核电退役市场空间巨大。

表 2 显示了按地区和年段划分现役核电机组的退役情况。从时间上看,2015 年以后的各个时间段中,2021—2030 年间的机组数量最多,达到 141 台,其次为 2031—2040 年间,共有 131 台面临退役,2040 年后退役机组共 112 台,2015—2020 年间面临退役的机组有 51 台。从地区分布看,北美和西欧在未来面临退役机组数量最多,预计分别为 119 台和 117 台,其次为远东和东欧,分别达到 98 台和 68 台,非洲和拉

美退役机组相对较少,分别只有 6 台和 2 台。

表 2 按地区和年段划分核电机组退役情况

年段 地区	2015—2020	2021—2030	2031—2040	2040 后	合计
北美	10	10	52	47	119
拉美	0	2	2	2	6
西欧	12	76	22	7	117
东欧	20	23	19	6	68
非洲	0	2	0	0	2
南亚与中东	1	1	3	20	25
远东	8	27	33	30	98
合计	51	141	131	112	

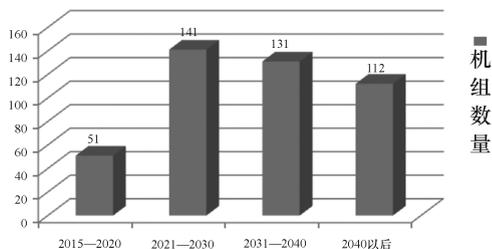


图 4 各年段计划关闭机组台数

图 5 为按地区划分的世界现役核电机组数量。从图中可以看出,北美地区的国家在 2031—2040 年间将达到退役高峰期,届时面临退役的机组数量将达到 52 台;拉美地区退役机组数量在未来各年段持平,退役市场较小;西欧地区在 2021—2030 年间将达到核电机组退役高峰期,届时将达到 76 台;东欧地区 2015—2040 年间各年段退役机组数量基本相当,分别为 20、23 和 19 台,2040 年后退役机组较少;非洲地区退役市场较小,只有 2 台机组在 2021—2030 年间面临退役;南亚与中东地区 2040 年前退役机组相对较少,机组退役主要集中在 2040 年后,届时将有 20 台面临退役;远东地区(主要是日本和中国)2020 年前退役机组较少,后期各年段退役机组数量基本相当,分别为 27、33 和 30 台。

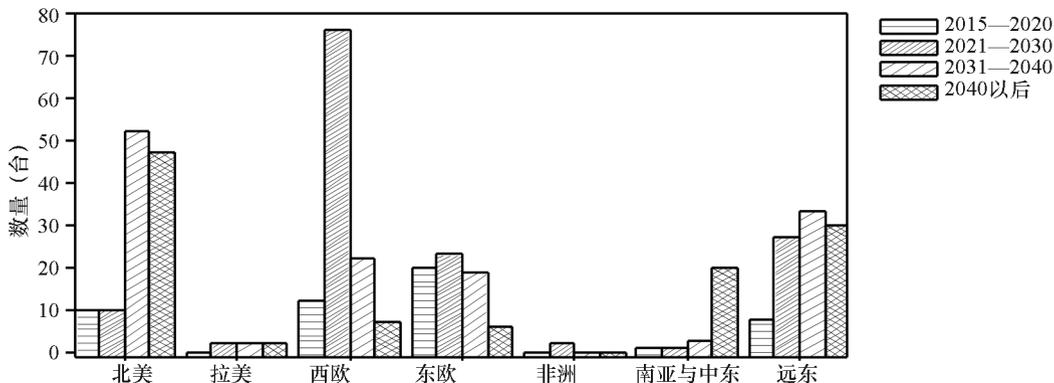


图 5 按地区分世界核电机组数量

图 6 为按时间区分世界各地退役机组数量。从图中可以看出,2015—2020 年间,北美、东欧、西欧面临退役的机组数量相当;2021—2030 年间,西欧面临退役的机组数量明显高于其它地区,总数达到 76

台;2031—2040 年间,北美和远东面临退役机组数量较多,分别达到 52 台和 33 台;2040 年后退役机组数量较多的地区主要集中在北美、南亚、中东与远东,退役机组数量分别达到 47 台、20 台和 30 台。

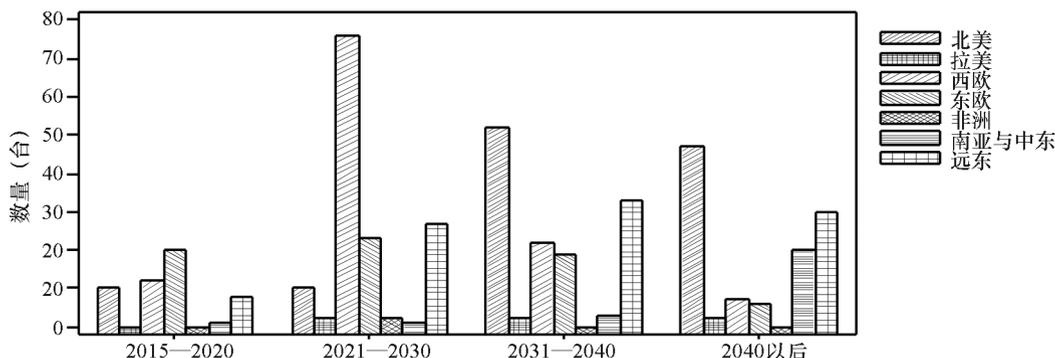


图 6 按时间区分世界各地退役机组数量

从上述分析中可以较为清晰的看出各个时间段世界各地区的退役市场情况。随着世界各国退役市场的不断扩大,我国应重视退役市场战略布局,加强核电推移市场的力量,抓紧核电站退役技术、核废料处理技术的研发,以保证后期顺利进入世界核电退役市场。

#### [参考文献]

[1] World Outlook for Nuclear Power [J]. Energy Strategy Reviews, 2013: 215-219.

[2] 任德曦,肖东生,胡泊.世界核电布局走向及对我国核电布局的启示[J].南华大学学报:社会科学版,2013(5):1-10.

[3] U. S. NRC. List of Power Reactor Units [EB/OL]. (2014-04-28) [2014-09-02]. <http://www.nrc.gov/reactors/operating/list-power-reactor-units.html>.

[4] IAEA. The Database Nuclear Power Reactors [EB/OL]. (2014-05-03) [2014-09-03]. <http://www.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryStatisticsLandingPage.aspx>.

[5] WNA. Nuclear Power in the USA [EB/OL]. (2014-05-03) [2014-09-03]. <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-T-Z/USA--Nuclear-Power/>.

[6] Finnish nuclear program gets Ready [N]. World Nuclear News, 2010-06-01.

[7] 孔德平. 老化管理大纲确保秦山核电厂延寿[J]. 中国核工业, 2007(11): 28-31.

[8] WNA. Nuclear Power in France [EB/OL]. (2014-05-03) [2014-09-04]. <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/France/>, July 1, 2014/August 5, 2014.

[9] WNA. Nuclear Power in Japan [EB/OL]. (2014-05-03)

[2014-09-03]. <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/Japan/>, June 20, 2014/August 5, 2014.

[10] WNA. Nuclear Power in Russia [EB/OL]. (2014-05-03) [2014-09-04]. <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-O-S/Russia--Nuclear-Power/>, July 10, 2014/August 5, 2014.

[11] WNA. Nuclear Power in South Korea [EB/OL]. (2014-05-03) [2014-09-04]. <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-O-S/South-Korea/>, July 1, 2014/August 5, 2014.

[12] WNA. Nuclear Power in India [EB/OL]. (2014-05-03) [2014-09-04]. <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/India/>, July 30, 2014/August 5, 2014.

[13] WNA. Nuclear Power in China [EB/OL]. (2014-05-03) [2014-09-04]. <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/>, July 18, 2014/August 5, 2014.

[14] WNA. Nuclear Power in Germany [EB/OL]. (2014-05-03) [2014-09-05]. <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-G-N/Germany/>, July 1, 2014/August 5, 2014.

[15] WNA. Nuclear Power in United Kingdom [EB/OL]. (2014-05-03) [2014-09-05]. <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-T-Z/United-Kingdom/>, August 1, 2014/August 5, 2014.

[16] WNA. Nuclear Power in Ukraine [EB/OL]. (2014-05-03) [2014-09-05]. <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-T-Z/Ukraine/>, July 1, 2014/August 5, 2014.