

中国核电装备的国产化

王远隆^{1,2}

1. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都 610041
2. 国家能源压水反应堆技术研发中心, 成都 610041

摘要 参考中国 3 大核电设备制造基地——东方电气集团公司、上海电气集团公司和哈尔滨电气集团公司, 依据在建核电项目中核电装备的研发、制造等公开资料对目前核电装备的国产化进行了概要性描述。核电站的大型关键主设备包括核电站核岛的安全壳、反应堆、稳压器、蒸汽发生器、主循环泵, 常规岛的汽轮机、冷凝器、除氧器、给水泵、汽水分离再热器等设备。对核电装备国产化整体现状的研究有助于对中国核电设备制造能力的认识, 也指出了中国核电装备制造需要努力的方向。

关键词 核电装备; 核岛; 常规岛; 核安全

中图分类号 TM623

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.20.011

Localization of Nuclear Power Plant Equipment in China

WANG Yuanlong^{1,2}

1. Key Laboratory on Reactor System Design Technology, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China
2. National Energy Pressurized Water Reactor Technology Research Center, Chengdu 610041, China

Abstract This paper reviews the localization of the current nuclear power plant equipment in China, based on the open literature related with research, development, and manufacture of the nuclear power plant equipment in nuclear power plant items under construction in China, including mainly three main manufacture bases of nuclear power plant equipment in China, which are Dongfang Electric Corporation, Shanghai Electric Corporation, and Harbin Electric Corporation. The main focus is the large key installations. They are the containment, the reactor, the pressurizer, the steam generator, the reactor coolant pump in the nuclear island, and the turbine, the condenser, deaerator, the feedwater pump, the dryer reheater in the turbine island, etc. The review shows the current situation of the localization in Chinese nuclear power plant equipment, the manufacture capability of Chinese nuclear power plant equipment and the development direction of the nuclear power plant equipment manufacture in China.

Keywords nuclear power plant equipment; nuclear island; turbine island; nuclear safety

0 引言

随着中国《核电中长期发展规划(2005—2020年)》^[1](简称《规划》)的公布, 中国核电发展进入了一个高峰期。尽管 2011 年 3 月日本发生了严重的福岛核事故^[2], 但这不会影响到中国的核电发展目标, 而只会使中国在吸取福岛教训后能更加稳妥地发展核电。

目前, 中国大陆已运行机组有 13 台, 另有 25 台机组已开工建造(其中秦山 4 号机组已于 2011 年 11 月 25 日成功并网), 这说明中国核电已进入成批次建造的发展阶段。

核电站是一个技术高度密集的大型复杂的工程装备大系统。核电站的设计、制造直至运营反映出—个国家的综合技术集成能力, 也从侧面反映了—个国家的综合国力。与核电强国相比, 中国核电技术水平和装备制造集成能力相对落后, 主要体现在缺少具有自主知识产权的核心技术, 没有像西屋、GE、阿海珐那样具有核蒸汽供应系统(NSSS)集成供货能力的企业集团^[3]。为确保中国核电建设和营运达到《规划》目标, 核电装备国产化自然就成为中国核电发展的重要努力方向。

收稿日期: 2012-05-21; 修回日期: 2012-06-15

作者简介: 王远隆, 高级工程师, 研究方向为反应堆控制系统设计和控制系统仿真技术, 电子信箱: wang_yuanlong126@126.com

图 1 为一个压水堆核电站的原理框图^[4],以蒸汽发生器为界,整个核电站由核岛(亦称一回路)和常规岛(也称二回路)2部分组成。核岛包括反应堆、蒸汽发生器、主泵、稳压器等主要大型设备;常规岛则有汽轮机、发电机、冷凝器、除氧器、给水泵、汽水分离再热器等设备。本文将依据图 1 对核电站主要设备的国产化进行概要性描述。

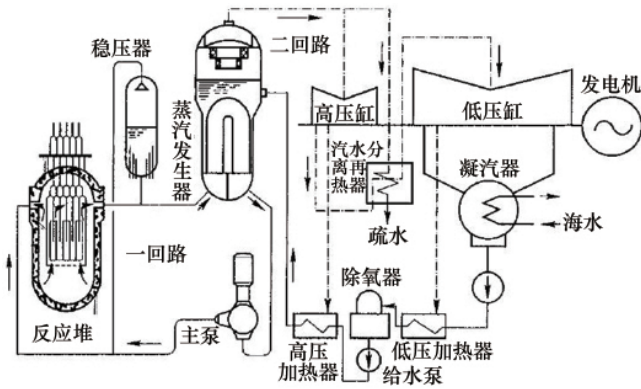


图 1 典型核电站原理图

Fig. 1 Principal diagram of a typical nuclear power plant

1 核岛设备的国产化

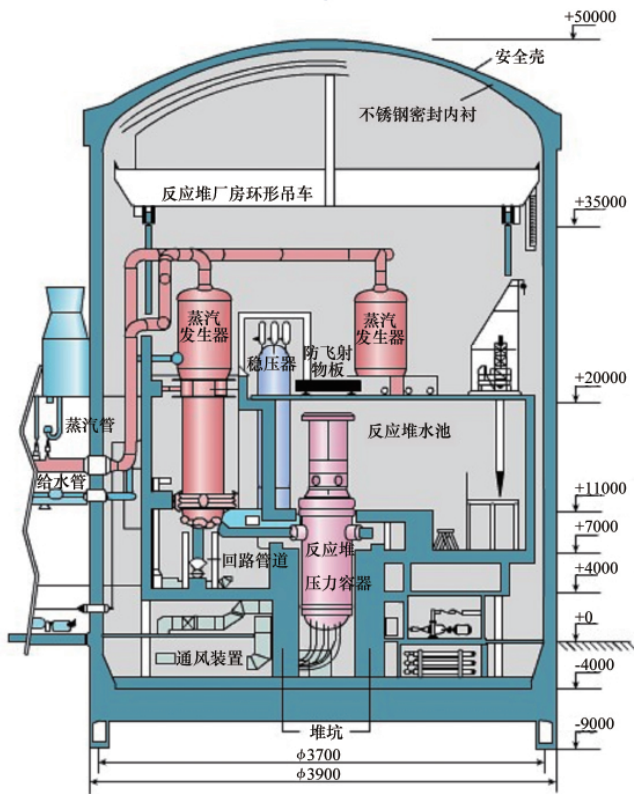
目前,中国核岛主设备制造布局主要有黑龙江、上海和四川 3 大核电设备制造基地。各基地相应建成了河北秦皇岛、上海临港和广州南沙出海口重型装备制造基地,初步具备年产 10 套左右 100 万 kW 级核岛主设备的能力^[5]。

核岛设备被包容在一个称为安全壳的大型承压容器里面,而安全壳本身还是核电站重要的放射性泄露安全屏障。

1.1 安全壳

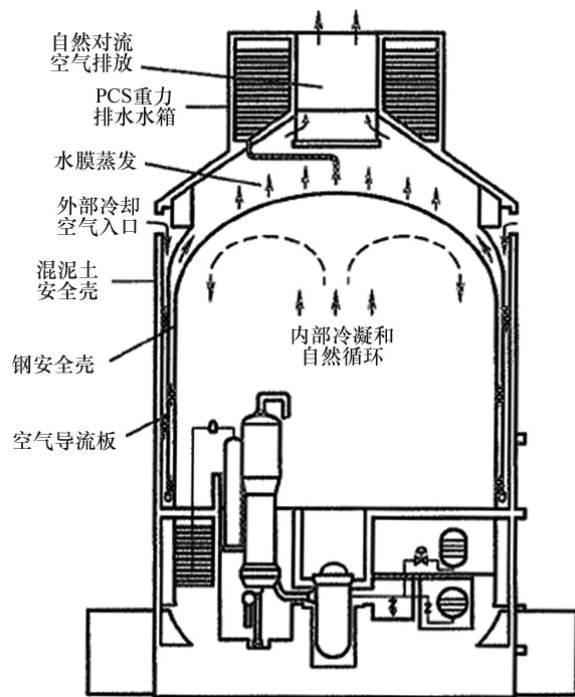
图 2(a)为典型核电站安全壳示意图^[6],它的标高和直径是工程典型实际尺寸;图 2(b)为引进的 AP1000 第 3 代核电站安全壳示意图^[6]。

2010 年,中国第二重型机械集团公司(二重)60MN 钢板成形液压机通过方案设计审查。该液压机是制造第 3 代核电机组 AP1000 安全壳封头的一种大型专用设备,将由二重自行制造。AP1000 安全壳由上下对应的 2 个碗状封头和 4 个环状筒体构成,最大直径约 40m,总高度约 66m,体积约 70000m³,总重量约 4000t。即使分成多块焊接,其单件圆弧封头的长宽尺寸也达 10m×4m,二重原有设备已不适应生产要求。



(a) 典型核电站安全壳(单位:mm)

(a) Containment of typical nuclear power plant (unit: mm)



(b) AP1000 第 3 代核电站安全壳

(b) Third generation of AP1000 nuclear power plant containment

图 2 反应堆安全壳示意

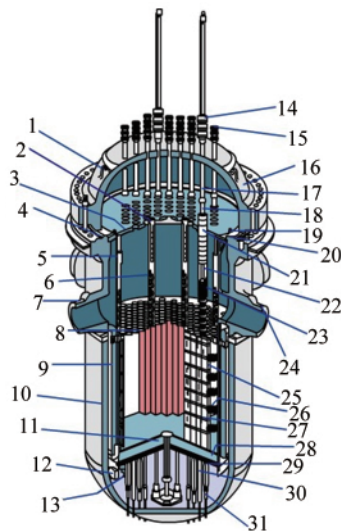
Fig. 2 Schematic diagram of nuclear reactor containment

2010年,方家山核电工程首台重要设备——1号机组环吊在大连重工起重集团通过出厂验收,该设备用于安全壳穹顶吊装。

2011年,首台 AP1000 核电机组钢制安全壳由山东核电设备制造有限公司制造完成,标志着中国开始基本掌握这种大型关键核设施的整体制造工艺技术。

1.2 反应堆

反应堆是核电站的核心设备,其简图见图 3^[5],反应堆的国产化基本情况如下。



- 1—吊耳;2—厚梁;3—上部支撑板;4—内部构件支撑凸缘;
5—堆芯吊篮;6—支撑柱;7—进口接管;8—堆芯上栅格板;
9—热屏蔽;10—反应堆压力容器;11—检修孔;12—径向支撑;
13—下部支撑锻件;14—控制棒驱动机构;15—热电偶测量口;
16—封头组件;17—热套;18—控制棒套管;19—压紧簧板;
20—对中销;21—控制棒导管;22—控制棒驱动杆;
23—控制棒组件(提起状态);24—出口接管;25—围板;
26—幅板;27—燃料组件;28—堆芯下栅格板;29—流动混合板;
30—堆芯支撑柱;31—仪表导向套管(中子探测器)

图 3 反应堆示意

Fig. 3 Schematic diagram of nuclear reactor

(1) 压力容器。

“十一五”期间,中核集团中国核动力研究设计院(中国核动力院)在实现 650MW、1000MW 核岛主设备自主设计的基础上,与中国第一重型机械集团公司(一重)、二重、东方电气、上海电气、哈尔滨电气等国内主要的大型制造企业展开合作,完成了中国首台完全自主开发的 100 万 kW 级核岛主设备——红沿河核电站 1 号机组反应堆压力容器的研制。

2011年,一重为红沿河研制成功 100 万 kW 级反应堆压力容器。一重还成功设计制造了世界上吨位最大、技术先进的 15000t 重型自由锻造水压机,并成功锻造出了 580t 大型钢锭,年锻造产量已达 15 万 t。

二重在核电锻件制造技术研发方面也取得重要突破:完成了核电压力容器法兰、接管段接管和过渡环等锻件的研制

并实现批量生产。二重还在 2010 年获得中国广东核电集团(中广核)核级设备鉴定与工艺评定中心颁发的 CPR1000 反应堆压力容器接管段筒体工艺评定认可证书。在这之前二重已经获得 CPR1000 反应堆压力容器 16MND5 过渡环、CPR1000 反应堆压力容器 16MND5 法兰等认可证书。

东方电气具备了压力容器的批量生产能力,2011 年已获订单 11 台。东方电气堆内构件年产可达 4—6 套^[7],并且已具备年产 5 套 1000MW 级核岛主设备供货能力。

2010年,三门核电、国核工程公司与上海电气核电设备有限公司签订了三门核电 3、4 号机组反应堆压力容器采购合同。

(2) 核燃料。

2010年,首批国产 VVER 核燃料组件——田湾 TW1/2R04 燃料组件在中核集团建中核燃料元件有限公司(中核建中)顺利通过出厂验收。田湾核电站 1、2 号机组进行第 4 次换料时,国产化的核燃料元件将用于这 2 台机组。江苏核电公司与中国原子能工业公司和建中核建中还签署了田湾核电站 1、2 号机组第 5、6 次换料供货合同。

中核建中已于 2008 年底建成了中国最大的压水堆核电站燃料元件生产线,具备了铀 400t/a 的生产能力。目前,该公司用户已有秦山一期、二期核电站,大亚湾,岭澳,巴基斯坦恰希玛核电站;今后还将陆续为江苏田湾核电站,秦山一期扩建工程方家山核电站,秦山二期 3、4 号机组,福建福清、宁德核电站,辽宁红沿河核电站,海南昌江核电站等用户制造并提供产品。该公司已实现第 5000 组燃料组件下线,其核燃料元件生产线扩建项目完成后将实现新增铀 400t/a 的生产能力,以适应今后中国核电发展需求。

(3) 驱动机构和棒控棒位系统。

2010年,由中国核动力院自主设计、制造的新一代核电设备 ML-B 型控制棒驱动机构国产化成功。

2010年,中国核动力院和北京核仪器厂联合研制并拥有完全自主知识产权的百万千瓦级核电站棒控棒位系统经鉴定通过。

2010年,三门核电、国家核电技术公司(国核技)与上海第一机床厂有限公司签订了三门核电 3、4 号机组堆内构件、控制棒驱动机构采购合同。

中广核集团有限公司也在积极研发这类系统。

(4) 相关重要设备。

2011年,上海电气核电设备有限公司为三门 AP1000 核电站一号机组制造的堆芯补水系统运抵现场。该设备设计压力为 17.1MPa,容积为 70.8m³,属非能动堆芯冷却系统,其作用是向堆芯提供应急冷却水且具有应急硼化功能。

2010年,中国首台具有自主知识产权的核电站装卸料机在中核集团西安核设备有限公司制造完成。该设备由中国核电工程有限公司设计,用于方家山核电工程。装卸料机是反应堆核燃料装卸贮存和工艺运输系统的核心设备。西核公司目前已具备制造该系统燃料转运装置、新燃料升降机、

吸装置、新燃料检查装置、燃料抓具、贮存格架等核电设备的技术和能力。

1.3 主管道

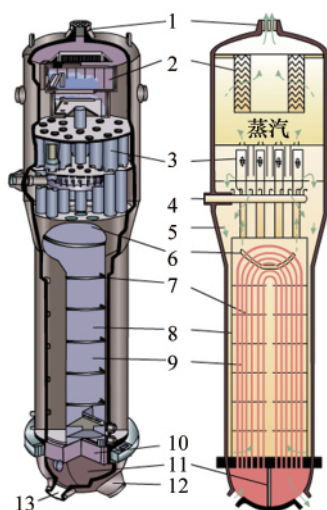
2010年,二重与国核技签订了浙江三门和山东海阳 AP1000 第 3 代核电站一号机组的主管道合同。二重是目前国内能提供全套 AP1000 核岛主管道的企业。

2010年,鞍钢重机公司成功锻造出了满足标准要求的,长 6.444m、重 54.44t 的 AP1000 核电站主管道模拟件。

渤海重工也成功生产出了 AP1000 主管道模拟件。

1.4 蒸汽发生器

蒸汽发生器是连接核电站一、二回路的关键设备(图 4)^[9]。



1—蒸汽出口管嘴;2—蒸汽干燥器;3—旋叶式汽水分离器;
4—给水管嘴;5—水流;6—防振条;7—管束支撑板;8—管束围板;
9—管束;10—管板;11—隔板;12—冷却剂出口;13—冷却剂入口

图 4 蒸汽发生器示意

Fig. 4 Schematic diagram of steam generator

2010年,由中国核动力院自主设计、上海电气核电设备有限公司于 2008 年开始制造的红沿河核电站首台蒸汽发生器完成交货。该设备呈筒型,长约 21.7m,重约 345t,内部装有 U 形管等上万个各类精细部件。该公司还与三门核电、国核工程公司签订了三门核电 3 号机组蒸汽发生器制造采购合同。

东方电气也已具备了生产蒸汽发生器的能力,2011 年获得 69 台订单^[7]。

2010年,二重成功锻制 2 支 AP1000 核电站蒸汽发生器关键锻件管板。与 CPR1000 管板相比,该管板属超大特厚饼形件,探伤要求严,锻造难度极大。它的锻制成功是国家 3 代核电技术国产化的新突破。

二重还成功锻造出了整体技术参数和性能要求很高的 3 支核电蒸汽发生器锥形筒节。

目前,二重在核电蒸汽发生器和管板锻件方面已能批量制造,蒸汽发生器锥形筒体中筒节、下筒节等锻件已实现大批量生产,管板产品的合格率稳定在 80%以上。

2011年,用于三门 AP1000 核电站 2 号机组的首台国产

蒸汽发生器,在哈电集团秦皇岛重装公司开工制造。

2010年,核电蒸汽发生器用 690U 型管制造在宝钢股份宝银特种钢管公司开工,首批产品将用于防城港核电站 1 号机组。690U 型管项目投产后,经过近 30 多批次的试生产,成功获得了《中华人民共和国民用核安全机械设备制造许可证》。

1.5 主泵

主泵是核电站一回路的关键设备(图 5)^[9]。哈电集团和沈鼓集团承担 AP1000 主泵的国产化任务。东方电气也在进行主泵国产化努力,将实现年产 12 台的目标^[7]。未来中国将有 10 台核电机组使用 AP1000 主泵。

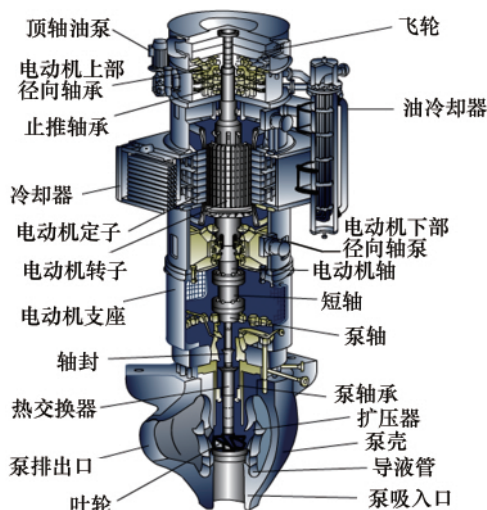


图 5 主泵示意

Fig. 5 Schematic diagram of reactor coolant pump

1.6 稳压器

稳压器是控制反应堆冷却剂系统压力的重要核岛设备(图 6)^[9]。

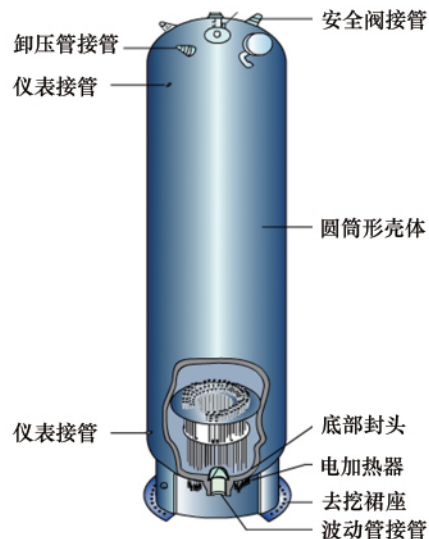


图 6 稳压器主泵示意

Fig. 6 Schematic diagram of pressurizer

2011年12月,三门核电1号机组稳压器运至现场。该设备由上海电气核设备厂承制,是AP1000核电机组核岛反应堆冷却剂系统首台国产稳压器。

2 常规岛设备国产化

限于篇幅,常规岛设备简图不再示出,仅以文字形式给予概述。

2.1 汽轮机

2010年,继国内首件核电1100MW半速转子联检成功后,二重也开始加工第二支1100MW核电半速转子毛坯件。

AP1000低压转子锻件是目前世界上所需钢锭最大、毛坯重量最大、截面尺寸最大的锻件。全套核电低压拼焊转子共分10段,采用5支钢锭制成。整套锻件技术要求高,验收标准极为严格。二重在国内首次完成了全套锻件的制造。锻件焊接则由法国阿尔斯通公司负责,拼焊后再由二重进行精加工。该锻件于2010年一次性成功交检。

二重为东方汽轮机公司生产的175MW核电中压排汽缸于2010年完成了由中广核监理的最终联检。

2010年,由江苏泰隆减速机制造有限公司开发研制的首批4台大型核电齿轮箱机组分别运抵辽宁红沿河核电站与福建宁德核电站使用。此前,这套设备一直从美、德、日等发达国家进口。

2010年,三门核电1号机组汽轮机转子试验成功。该转子是目前国内首次使用的最大整锻无中心孔转子,末级动叶片长达137.16cm。三门核电一期工程汽轮机出力为1251MW,转子及动叶片等核心部件由日本三菱重工供货。汽轮机转子制造完成后,再运到哈动股份秦皇岛基地进行汽轮机总装试验。

2011年,由上海电气上海汽轮机有限公司自主开发的300MW核电汽轮机DEH电液控制系统成功应用于巴基斯坦恰希玛核电站C2机组。DEH系统是核电汽轮机组的指挥中心,汽轮机的启停、运行等一系列动作均需接受它的指令后才能实现。

2.2 除氧器

2011年,由哈尔滨锅炉厂有限责任公司制造的世界首座AP1000核电站三门1号机组的2台除氧器和1台除氧器水箱顺利完工。除氧器单台长度约20m,直径3m,重约64t;水箱长43.5m,直径5.3m,重250.4t。

2.3 主管道

2010年,武汉重工完成海阳AP1000核电项目常规岛主蒸汽、主给水及旁路管道首件试制,这是首套国产AP1000常规岛管道设备。

2.3 汽水分离再热器

东方电气具备16台汽水分离再热器供货能力。

3 其他

核级阀门方面,中核苏阀能生产大口径阀门。上海电气

则突出于百万千瓦级核泵阀制造。上海阀门厂除生产小口径阀门外,也进行大口径阀门的研制。2010年上海阀门厂签订了阳江核电和防城港核电共3000万元的订单。

2011年,重庆水泵公司成功自主研发制造出核电上充泵。

2010年,首批4台国产核电冷水机组从武汉麦克维尔公司运往大连红沿河核电站建设工地,该设备用于核岛散热。目前,这类核电设备的国产化率已达70%,成本由进口的2200美元/(kW·h)下降为1300美元/(kW·h)。

2010年,由中国核动力院自主研制的国产化电气贯穿件实现首批供货。

2010年,中国电科院所属北京国网富达科技发展有限公司承担的青岛海阳核电站定子吊装架构设备研制任务顺利完成。

2010年,由中核集团武汉核电技术运行股份有限公司承担研制的三门核电2号机组全范围模拟机合同正式签署。中广核、国核技也正在积极开发这类系统^[8]。

核电软件开发也是核电建设的重要组成部分。核电装备的设计与核能系统的功能分析等都需要软件支撑,国内相关科研单位与院校通过合作正在积极开发核电软件。但从总体来看,主要软件还是以进口为多^[9]。

核能方面的中国国家标准的制定也是极为重要但又非常复杂的工作,这里不再展开叙述。

4 国产化过程中的核安全思考

安全是核能的生命,如何将核安全意识融入到核电装备的国产化进程中并进一步融入到所在环境的社会文化中是核能发展的重要着眼点。

中国俗语说“曲突徙薪为彼人,焦头烂额为上客”,其含意是有人在失火得救后很是感激救火人,但却忘了曾经忠告过自己的人。防微杜渐是中国先人很有预见性的安全观。

日本福岛核事故调查委员会负责人曾总结说:“人类有一种恶习,不看自己不愿意看的东西,不考虑自己不愿意考虑的事情和忽视一些对自己不利的事情。”美国的本杰明·弗兰克林则讲:“经验和教训始终是收费昂贵的学校。”这些也同样可以作为中国发展核电的箴言。从美国三哩岛核事故到苏联切尔诺贝利核事故,再到2011年3月的日本福岛核事故,其实都在证明东西方和国内外的古今有识之士所告诫的话语是很值得认真思考的。任何事情如果急于求成,过热之下就一定有泡沫出现,这种现象对核电发展而言,是潜在而又安全风险极高的隐患,需要倍加警惕^[10]。

5 结论

按《规划》目标,到2020年,中国核电运行装机容量应达7000万kW;形成核电装备自主设计,主设备、关键配套设备制造和核级原材料提供的能力,并具备成套出口的能力。

目前,压力容器、蒸汽发生器、堆内构件、控制棒驱动机

构、主管道能立足国内生产;轴封泵、安全壳、稳压器等可国内制造。常规岛和相关设备中,汽轮机、发电机和汽水分离再热器可批量生产,除主给水泵、水压试验泵、凝结水泵、主蒸汽隔离阀和安全阀等,其余已经实现国产。非核级仪控、应急柴油发电机、贯穿件、输变电等设备已国产。核级DCS、K1电机、直流和不间断电源等正在研制。

总体上讲,与西屋、GE、阿海珐等国外企业集团相比,建立在设计与制造融合基础上的核电装备综合集成能力是中国核电装备制造企业存在的主要差距。国内企业在这方面的能力提升是核电站主要设备国产化的关键环节,也是《规划》目标实现的关键环节。在中国核电装备国产化的进程中,核安全问题仍然是设计、制造和运营等整个过程应考虑的。

致谢:本文材料来源除所列参考文献外,还有相关行业网站内容,因目次太多,没有附上,这里一并致谢。

参考文献 (References)

- [1] 国家发展和改革委员会. 核电中长期发展规划(2005—2020)[R]. 北京: 中国新闻网, 2007.
National Development and Reform Commission. The middle and longer development plan (2005—2020) [R]. Beijing: Chinese News Service, 2007.
- [2] Nuclear Emergency Response Headquarters Government of Japan. Report of the Japanese government to the IAEA ministerial conference on nuclear safety: The accident at TEPCO's Fukushima nuclear power stations[R]. Japan Japanese Government, 2011.
- [3] 苏州热工研究院. 中国核电国产化综述 [J]. 核电信息周刊, 2011, 396(37): 1-65.
Suzhou Nuclear Power Research Institute. *Nuclear Power Information Weekly*, 2011, 396(37): 1-65.
- [4] 广东核电培训中心. 900MW 压水堆核电站系统与设备(上册)[M]. 北京: 原子能出版社, 2005.
Guangdong Nuclear Power Plant Training Center. 900MW pressurized water reactor power plant systems and equipment (Volume one) [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2005.
- [5] 秋穗正. 压水堆核电厂基本原理[R]. 成都: 中国核动力研究设计院, 2011.
Qiu Suizheng. Pressurized water nuclear power plant basic principles[R]. Chengdu: Nuclear Power Institute of China, 2011.
- [6] Westinghouse Electric Company. AP1000: A simple, safe, and innovative design that leads to reduction in safety risk[EB/OL]. [2011-08-28]. www.westinghousenuclear.com.
- [7] 明向军. 东方电气核电发展概况[R]. 成都: 四川省核学会反应堆工程专委会, 2011.
Ming Xiangjun. The nuclear power development report on Dongfang Electric Corporation [R]. Chengdu: Reactor Engineering Institution of Sichuan Nuclear Society, 2011.
- [8] 中国核能行业协会. 首届核能行业仿真技术与应用研讨会论文集[C]. 北京: 中国核能行业协会, 2011.
Chinese Nuclear Energy Society. The papers on the first communication lecture on nuclear energy simulation techniques and application [C]. Beijing: Chinese Nuclear Energy Society, 2011.
- [9] 王远隆. 核电仪控技术应用中的基本问题[J]. 中国核电, 2010, 3(4): 301-307.
Wang Yuanlong. *China Nuclear Power*, 2010, 3(4): 301-307.
- [10] 王远隆. 对日本福岛核事故的一点思考[R]. 成都: 四川省核学会反应堆工程专委会, 2011.
Wang Yuanlong. A few of viewpoints on Fukushima nuclear power plant accident in Japan [R]. Chengdu: Reactor Engineering Institution of Sichuan Nuclear Society, 2011.

(责任编辑 孙秀云, 马骁骁)

· 学术动态 ·

“第十五届中国中西医结合大肠肛门病 学术交流大会”征文

由中国中西医结合学会大肠肛门病专业委员会主办的“第十五届中国中西医结合大肠肛门病学术交流大会”拟于2012年9月1日在济南市召开。

征文范围:结直肠肛门外科领域的新理论、新技术、新材料,有关的手术并发症;腹腔镜技术、结直肠肿瘤的综合治疗、影像学在该领域中的应用、内窥镜技术;便秘、肛门失禁、痔、肛痿、肛裂等肛门常见疾病的诊断、治疗与护理。

论文截稿日期:2012年7月31日

联系电话:18663733307, 13075300224

电子邮箱:doclf@163.com cmsimba@126.com

大会网站:www.caim.org.cn/CN/News/2012-01/EnableSite_ReadNews545011201326384000.html