

# 核安全设备科普知识

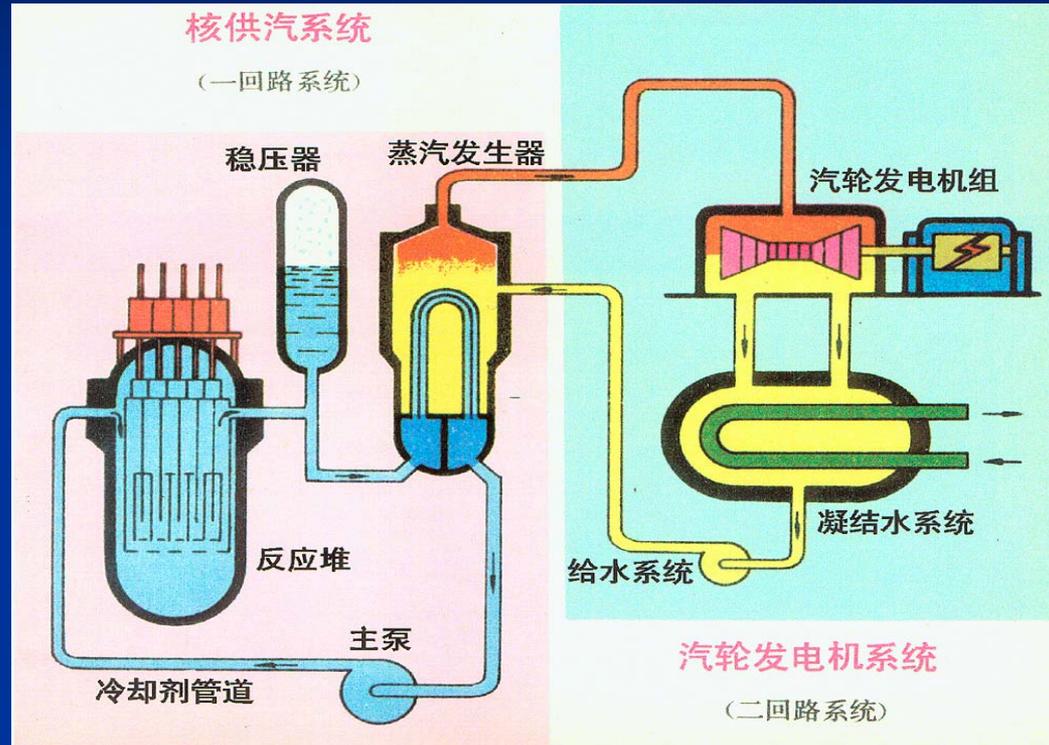
北方核与辐射安全监督站

# 一、压水堆核电厂简介

利用核能生产电能的电厂称为核电厂。核电厂是由复杂的系统和庞大的设备组成，通常划分为两部分：核岛和常规岛。通常将一回路及核岛辅助系统、专设安全设施和厂房称为核岛。二回路及其辅助系统和厂房与常规火电厂的系统和设备相似，称为常规岛。压水堆核电厂流通原理如右图所示。

核岛部分主要由核蒸汽供应系统组成，包括：一回路系统、主要辅助系统和安全系统以及核测量、控制区、保护和电气系统，常规岛部分主要包括二回路系统（汽轮机发电机系统）、循环水系统、电气工程及厂用电设备。

一回路一般由2~4个环路对称地并联在压力容器接管上构成。一般每30万KW电功率设置一个环路，秦山二期65万KW机组的一回路就有两个环路，大亚湾核电站90万KW机组的一回路就有三个环路，而田湾核电站106万KW机组的一回路就有四个环路。每个环路有一台主泵和一台蒸汽发生器。在其中一个环路上装有一台稳压器，以维持一回路运行压力。



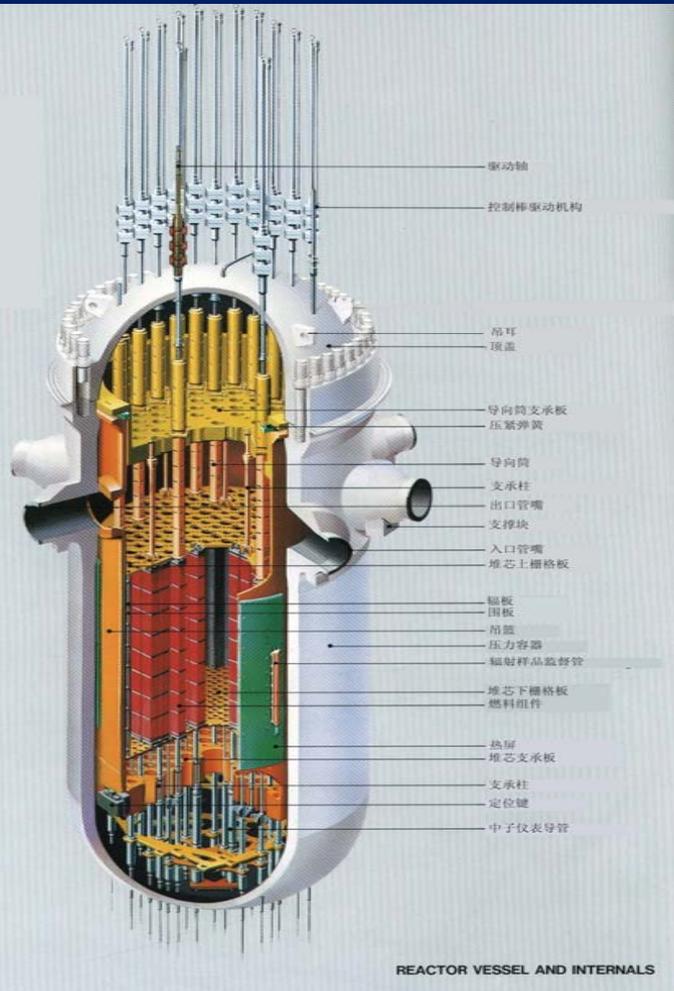
## 二、典型压水堆的堆本体结构

核反应堆本体的任务是确保堆芯能按核设计要求进行安全的可控的链式反应；确保核裂变释放的热量能按热工水力设计要求有效地导出；确保在寿期内处于满功率运行，全部堆内构件保持良好性能，即使在事故时仍能保证堆结构的完整性和安全性。

堆本体结构除了和一般动力设备一样对强度、刚度、耐热、抗腐等性能有较高的要求外，还须满足核性能和耐辐照的苛刻要求。为了确保电站动力堆安全可靠运行，对堆内主要构件从选型、选材到加工、组装都要做大量的试验研究工作。对有的重要部件还需放在其他反应堆内进行实际考验，当证明其性能符合要求后才能正式使用。因此，反应堆本体是核电站设备中技术难度最大，加工制造精度最高，生产周期最长的关键设备。

堆芯结构是反应堆的核心部件。核燃料要在这里实现链式裂变反应，并将核能转化为热能。堆芯又是一个很强的放射源。

压水堆本体由反应堆压力容器、堆内构件、堆芯燃料组件、控制棒组件及控制棒驱动机构、以及其他与堆芯有关的部件组成。左图所示为典型压水堆的本体结构。

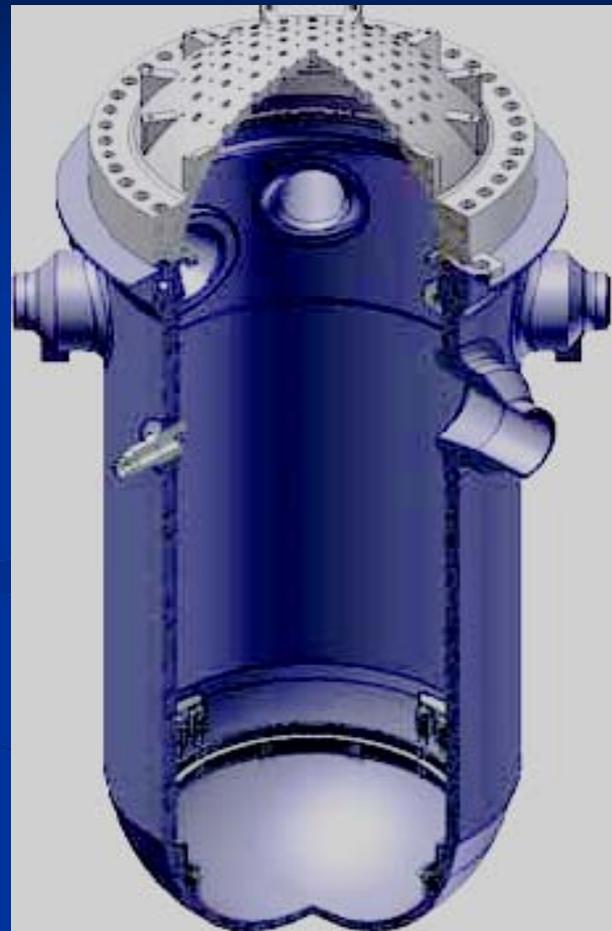


# 三、反应堆压力容器

反应堆压力容器RPV是核电站最关键的部件，是一个底部焊有半球形封头的圆筒形承压密封容器，顶部为用法兰螺栓连接的可拆卸半球形封头顶盖。不仅用于支撑和容纳堆芯和堆内构件，还必须保持冷却剂的高温高压密封。它是一回路冷却剂的重要压力边界和防止裂变产物溢出的一道重要安全屏障。如右图所示，其总高一般为11~13m，总重量一般为300~400吨，筒体内径一般为4m左右，筒体壁厚一般为200~250mm。

压力容器内装有堆芯燃料组件、上部及下部堆内构件、控制棒等功能组件、以及其他与堆芯有关的部件。控制棒驱动机构及堆内测温装置的管座（39~65个）都通过液氮冷却装配贯穿在压力容器顶盖上，然后进行镍基堆焊和对称焊接，以防垂直变形，还要采取一定的焊接顺序，防止顶盖的应力变形，焊接工艺难度较大。压力容器本体由4~5个筒节和下封头环形拼焊而成。筒节均为整体锻件，无纵缝。6~8个冷却剂进出口接管一般是通过马鞍形焊缝连接到相应的筒节。

压力容器材料要求有较高的机械性能、抗辐照性能和热稳定性，常用材料一般为高强度低合金钢，内表面所有与冷却剂接触的部位堆焊厚度不小于5 mm的不锈钢衬里。压水堆核电厂发展至今，除俄罗斯采用Cr-Ni-Mo钢外，我国和美、法、德、日等国，均采用Mn-Ni-Mo钢，如SA 508-III。

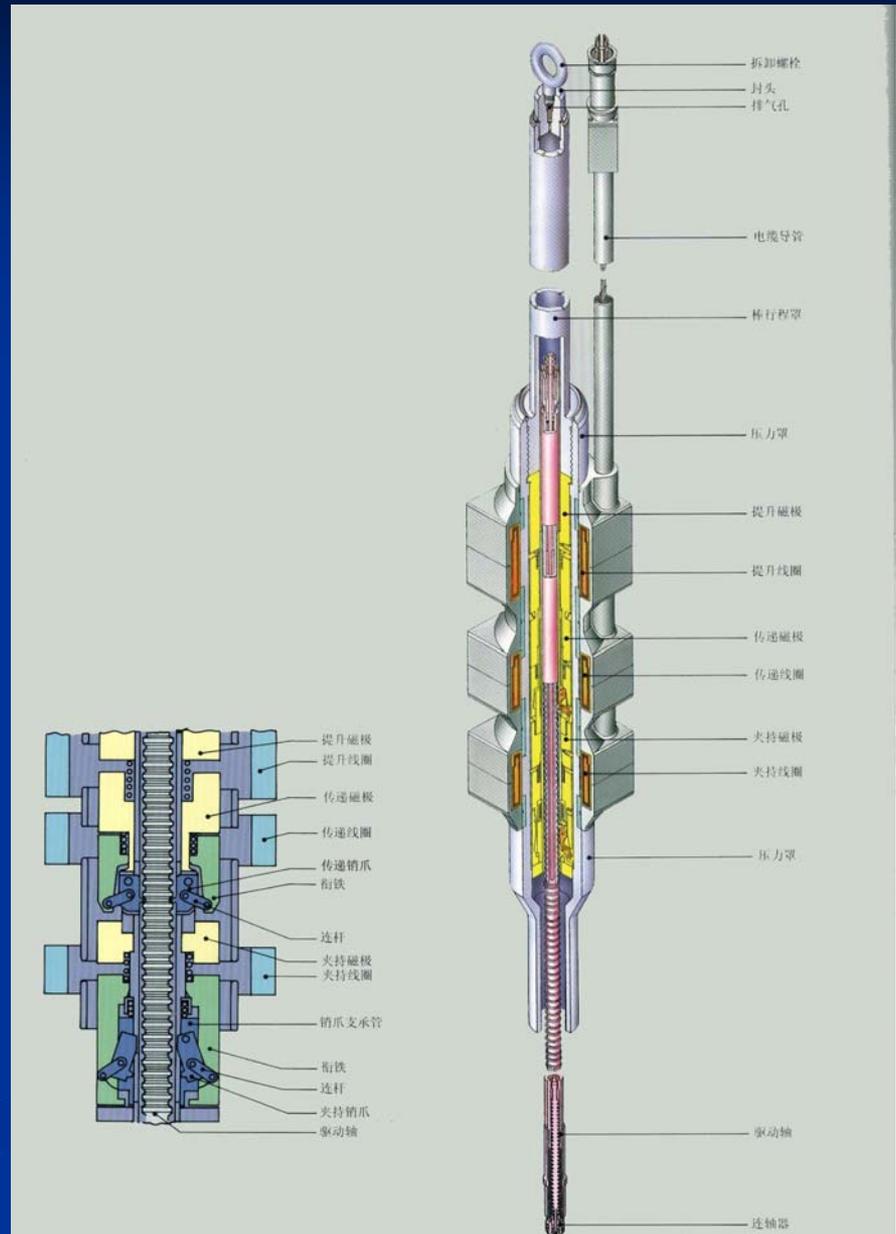


# 四、控制棒驱动机构

控制棒驱动机构是核反应堆安全重要动作部件，通过它的动作，带动控制棒组件在堆芯上下抽插，以实现反应堆的启动、功率调节、停堆操作。

控制棒驱动机构如右图所示，包括内部钩爪组件、驱动轴组件、耐压壳组件、磁轭线圈组件和位置指示组件。其中，耐压壳组件是驱动轴和销爪组件的包壳，由圆长管密封承压壳及其上部位置传送器套管组成，圆长管密封承压壳由分段壳体以 $\Omega$ 密封环焊接而成。

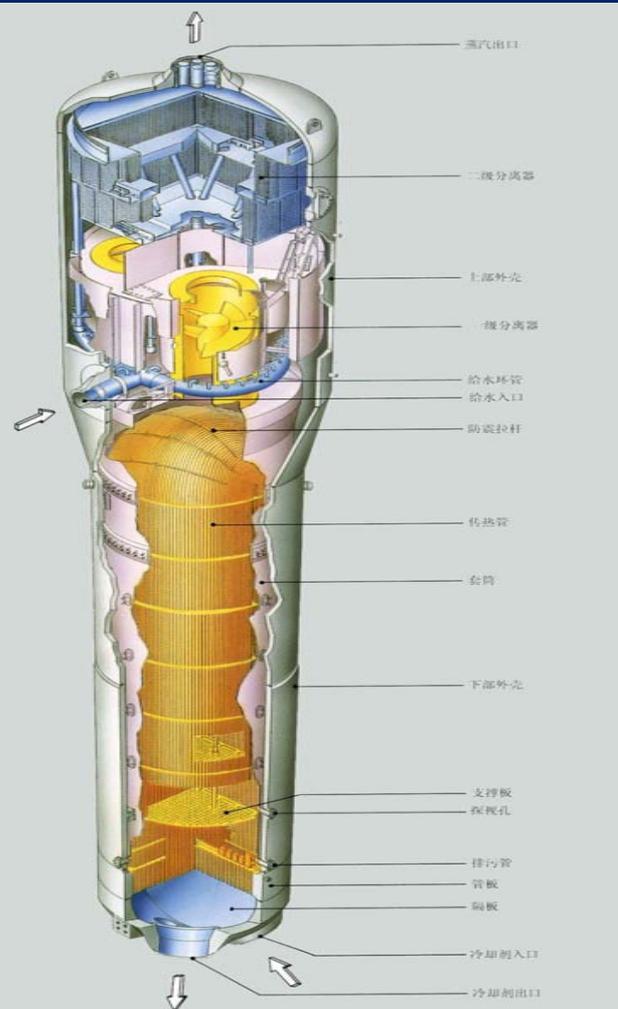
同时，耐压壳安装在压力容器管座上，它与管座采用梯形螺纹连接和小 $\Omega$ 密封环焊接密封。耐压壳是承压边界，该承压边界的破损将产生放射性的冷却剂外溢。因此，该组件的 $\Omega$ 密封环焊是质量保证的重要内容。



# 五、蒸汽发生器

蒸汽发生器SG是压水堆核电站一回路和二回路之间的枢纽，它将反应堆产生的热量传递给二回路，并将二回路的给水变成蒸汽，推动汽轮机做功。同时，蒸汽发生器又是分割一回路和二回路介质的屏障。种类繁多，但目前压水堆核电站中使用较为广泛的是立式U形管自然循环蒸汽发生器。立式U形管自然循环蒸汽发生器典型结构如图所示。蒸汽发生器总高约20m，整个结构由下筒体蒸发段和上筒体汽水分离段两部分组合而成。

蒸汽发生器筒体由上封头、上筒体、锥形连接段及下筒体组成，用厚75~100 mm的锰—铝—镍低合金钢板卷制或整体锻件环焊缝焊接成一个整体。下筒体外径约3.5 m，锥形段以上被扩大到约4.5 m。筒体组件下端与管板、下封头焊接成一个整体。管板厚约500~800 mm，采用高强度Mn—Mo—Ni低合金钢锻造而成，属于超厚锻件，且要求具有优良的塑韧性和淬透性，锻造难度较大。另外，大型管板上需要钻出近万个管孔，且对管孔的孔径公差、节距公差、形位公差和光洁度要求很高。因此，深孔钻也是蒸汽发生器制造过程中的一个关键工艺。传热管与管板连接采用管板全深度胀管工艺加端部密封焊接，消除管孔与传热管间隙，避免间隙内沉积、浓缩化学物质。

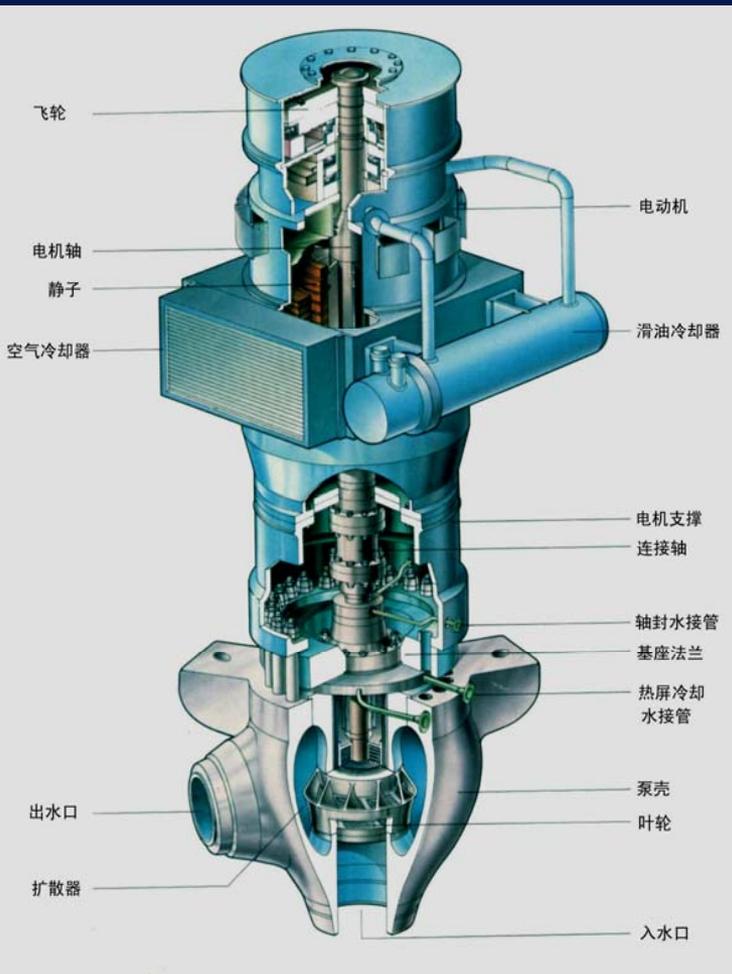


# 六、反应堆冷却剂泵

反应堆冷却剂泵（简称主泵）用于驱动带有放射性的高温高压的冷却剂，形成强迫循环，使其以很大的流量流经堆芯，把堆芯核反应过程产生的热量传送给蒸汽发生器。主泵是压水堆冷却剂回路系统中唯一高速运转的机械设备，又是十分精密的功率强大的设备，属于压水堆电站的关键设备之一。

现代压水堆核电站使用最广泛的反应堆冷却剂泵是立式、单级轴密封泵。从底部到顶部分为三个部分，即水力机械部分、轴密封组件部分和电动机部分。泵壳是一回路压力边界的一部分，为核1级部件。应能承受设计工况以及事故状态下的各类载荷。轴向进水口在下部，出水口与叶轮成切线方向。管口与一回路管道全厚度焊接。叶轮是一个单级有7个螺旋叶片组成的不锈钢铸件，装在泵轴的下端。

轴密封组件部分保证主泵轴向的密封，包括三个轴密封、主法兰和密封罩等部件；通过连续的三级泄漏，将系统压力过渡到大气压。



驱动电动机通常采用是空气冷却鼠笼式感应电动机，非核级，额定功率约为6.5MW，由6.0kV母线供电。惯性/惰转飞轮提高了主泵的惰转性能，当主泵突然断电时，泵仍能继续运行十几分钟，以保证有足够的堆芯冷却，及时采取应急措施，从而提高了全厂断电时堆芯的安全性。

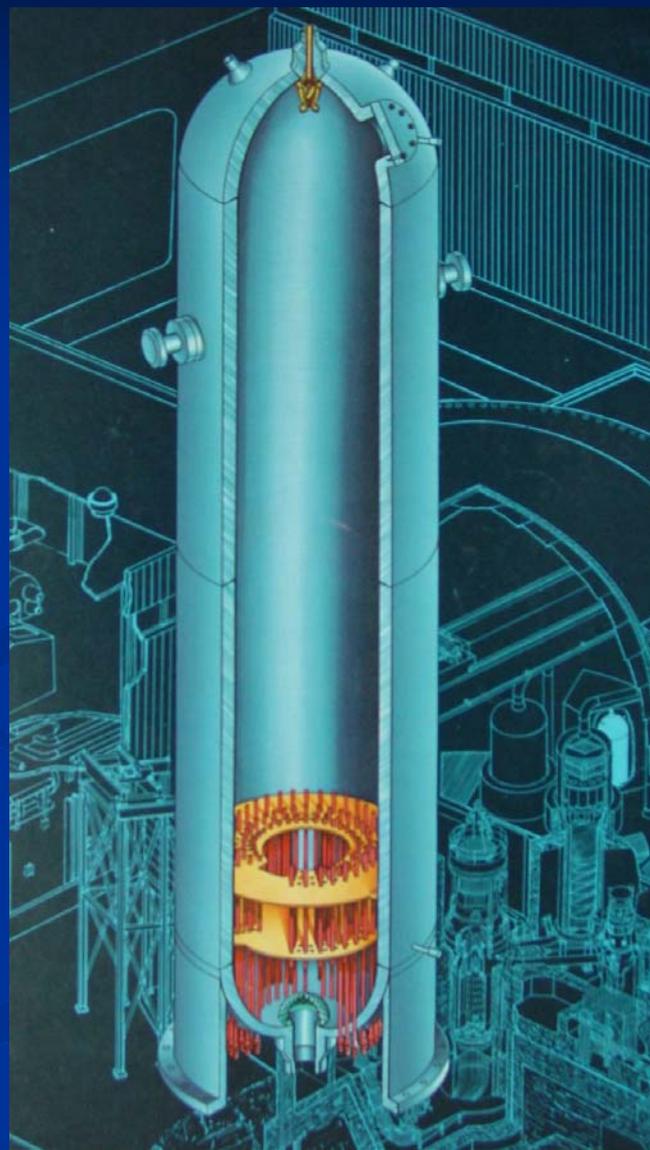
# 七、稳压器

稳压器是对一回路冷却剂系统压力进行控制和超压保护的重要设备，基本功能是建立并维持一回路系统的压力，避免冷却剂在反应堆内发生容积沸腾。此外，稳压器作为一回路系统的缓冲容器，吸收一回路系统水容积的迅速变化。

如右图所示大亚湾稳压器结构，其为一立式上下为半球形封头的圆柱筒形高压容器，高13 m，直径2.5 m，净重80 t，安装在下部裙座上，裙座通过地脚螺栓将稳压器固定在地基上。整个稳压器由容器、波动管、电加热器、喷淋管路、安全阀组等部件组成。

在稳压器的底封头上安装有电加热器。两块水平板在容器内侧支撑加热器，以防止横向振动。波动管接在底封头的最低点，其正上方设有挡板式滤网，使水波动进、出稳压器，并防止杂物进入反应堆冷却剂系统的其他地方。

在顶封头上装有喷淋管线和安全阀接管。为了减小波动管和喷淋管线与稳压器本体关联处水温差别造成的热应力，在接管处设有热套管结构。



# 八、主管道

通常压水堆核电站的反应堆冷却剂系统由2~4个环路组成，每条环路包括一台蒸汽发生器、一台主泵和将这些设备与反应堆压力容器连接起来的反应堆冷却剂管道，也称主管道，如右图红色管道部分。

每条环路中反应堆压力容器与蒸汽发生器之间的主管道称为热管段（热腿），蒸汽发生器与主泵之间的主管道称为过渡段，主泵与反应堆压力容器之间的主管道称为冷管段（冷腿）。

AP600和AP1000堆型核电站主泵直接悬挂在蒸汽发生器下封头汇水腔下，省去了主管道过渡段。主管道3个管段的直径略有差异，一般在700~800mm左右，壁厚80mm左右。每个管段上还带有一定数量的接管嘴，其中位于冷管段上的上冲管接管嘴还带有热套管。每个冷管段还带有一个45°斜接管嘴。

